

Alena Tarbeevskaya

**Entwicklungssystematik des Thermomanagements qualitativ
hochwertiger LED-Systeme**

Schriften der Ilmenauer Lichttechnik

Herausgegeben von
Prof. Dr. Christoph Schierz,
Fachgebiet Lichttechnik
an der Technischen Universität Ilmenau.

Band 22

Diese Reihe setzt ab dem Band 20 die „*Publikationsreihe des
Fachgebietes Lichttechnik in Ilmenau*“ fort.

Entwicklungssystematik des Thermomanagements qualitativ hochwertiger LED-Systeme

Alena Tarbeevskaya



Universitätsverlag Ilmenau

2017

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung:	03. Januar 2016
1. Gutachter:	Univ.-Prof. Dr. sc. nat. habil. Christoph Schierz (Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter:	Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann (Karlsruher Institut für Technologie)
3. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Baumgart (Hochschule Ravensburg-Weingarten)
Tag der Verteidigung:	02. Oktober 2016

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

ISSN 2513-1656

ISBN 978-3-86360-168-3 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000889

KURZZUSAMMENFASSUNG

Die Forderung nach immer leistungsfähigeren LED-Systemen bei gleichzeitig begrenzten Platzverhältnissen bedeutet eine steigende Anforderung an das Thermomanagement. Dabei trägt eine geringe Chiptemperatur der LED zu einer hohen Effizienz und einer langen Lebensdauer bei. Aufgrund der größeren Anzahl von verkoppelten Elementen, die in unterschiedlichen Disziplinen realisiert werden, ist der Entwicklungsprozess der LED-Systeme sehr komplex. Dabei entsteht Bedarf nach einem disziplinübergreifenden Entwicklungsprozess, der die Aufgaben, Probleme und Anforderungen aller Disziplinen berücksichtigt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine mögliche Verzahnung der relevanten Disziplinen, wie der Optik, des Thermomanagements und der Elektrotechnik mit der ingenieurwissenschaftlichen Vorgehensweise in der Produktentwicklung spezifiziert. Das Ergebnis ist eine Systematik, die den Entwicklungsprozess der LED-Systeme strukturiert und darin geeignete Methoden und Werkzeuge des Thermomanagements einordnet. Die durchgängige Anwendbarkeit der Entwicklungssystematik wurde anhand der Konzipierung zweier Demonstratoren nachgewiesen. Hierbei wurde gezeigt, dass das Zusammenwirken der verschiedenen Disziplinen Potentiale für die Gestaltung neuer Produkte und Anwendungen eröffnet.

ABSTRACT

The thermal management of LEDs is important for the reliability and optical performance. As a result of increasing LEDs power levels, heat dissipation reserves to be a big challenge for the development of LED engines, especially for large lighting requirements. The product development process for LED devices is very complex due to the integration of many components from various engineering disciplines. Under these circumstances, there is a strong need for the systematic flow which takes into account of interdisciplinary process requiems for developing the LED systems.

A systematic approach and timely interlocking of the engineering disciplines for the development of energy-efficient LED devices is proposed in this thesis. This ensures the LED power devices to function fault free in thermal management perspective. The presented systematic flow supports the entire product development process and provides suitable methods and technologies for the thermal management of LEDs. An effectiveness and applicability of the created systematic flow has also been evaluated in this work. To verify it, two different high power LED devices have been developed, realized and tested. It was shown that the close interaction between the engineering disciplines for developing of the lighting systems opens up new LED products and new application possibilities.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzzusammenfassung	V
Abstract	VI
Inhaltsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Zielstellung und Abgrenzung.....	3
1.2 Struktureller Aufbau.....	4
2 Stand der Wissenschaft.....	7
2.1 Begriffsdefinition und Einordnung.....	8
2.1.1 Produktlebenszyklus.....	8
2.1.2 Systematik.....	11
2.2 LED-Systeme in der Allgemeinbeleuchtung.....	12
2.2.1 Funktionsweise.....	13
2.2.2 Degradation des Lichtstroms.....	15
2.2.3 Grundstruktur eines LED-Systems.....	17
2.3 Wärmeübertragung im LED-System.....	20
2.3.1 Die Wärmeübertragungsmechanismen	20
2.3.2 Temperaturen im LED-System	30
2.4 Thermische Modellierung.....	32
2.4.1 Wärmenetzmethode	33
2.4.2 Numerische Methoden	38
3 Interdisziplinärer Entwicklungsprozess der LED-Systeme	43

INHALTSVERZEICHNIS

3.1	Anforderungsanalyse.....	44
3.2	Vorgehensmodelle für die Entwicklung komplexer technischer Systeme	45
3.3	Anwendung auf LED-Systeme	48
3.3.1	Das V-Modell als Makrozyklus.....	49
3.3.2	Das V-Modell als Mikrozyklus	53
3.3.3	Modellbildung und Modellanalyse	55
4	Entwicklungssystematik zum Thermomanagement der LED-Systeme in der Allgemeinbeleuchtung	61
4.1	Phase 1: Design.....	62
4.1.1	Randbedingungen und Zielparameter	64
4.1.2	Konzeptionelle Auslegung	66
4.1.3	Initialentwurf	67
4.1.4	Optimierung des thermischen Verhaltens	88
4.2	Phase 2: Fertigung	92
4.2.1	Tolerierung.....	94
4.2.2	Fertigungseignung und Herstellbarkeit	95
4.3	Phase 3: Validierung.....	98
4.3.1	Thermische Charakterisierung	99
4.3.2	Bewertung des Thermomanagements	101
5	Thermomanagement im Toleranzvergabeprozess.....	105
5.1	Produktgerechter Toleranzvergabeprozess	106
5.1.1	Toleranzspezifikation	107
5.1.2	Toleranzmodell	108
5.1.3	Toleranzrechnung	109
5.1.4	Handlungsfeld	112

INHALTSVERZEICHNIS

5.2	Thermischer Kontaktwiderstand	113
5.2.1	Analytische Modelle.....	115
5.2.2	Messverfahren	117
5.3	Experimentelle Untersuchungen.....	123
5.3.1	Vorbereitung der Test-Systeme	124
5.3.2	Versuchsdurchführung.....	126
5.3.3	Bewertung der Verbindungsqualität	128
6	Validierung der Entwicklungssystematik.....	139
6.1	Anwendungsbeispiel: Tischleuchte	140
6.1.1	Phase1: Design	141
6.1.2	Phase 2: Fertigung.....	164
6.1.3	Phase 3: Validierung	169
6.2	Anwendungsbeispiel: Straßenleuchte	179
6.2.1	Phase1: Design	181
6.2.2	Phase 2: Fertigung.....	197
6.2.3	Phase 3: Validierung	200
6.3	Bewertung der Entwicklungssystematik	200
7	Zusammenfassung und Ausblick	205
	Anhang	209
	Danksagung	213
	Literaturverzeichnis	215

Kapitel 1

EINLEITUNG

Rund 125 Jahren nach der Erfindung der Glühlampe durch Thomas Alva Edison Ende des 19. Jahrhunderts eröffnet die Leuchtdiode (kurz LED von engl. “Light Emitting Diode”) eine neue Dimension in der Lichttechnik. Ihre Einsatzbereiche erstrecken sich von der Fahrzeugbeleuchtung bis zur neuesten Generation von TV-Geräten und zuletzt findet man sie als Ersatz für Glühbirnen und Energiesparlampen in der Allgemeinbeleuchtung wieder. Die wohl wichtigsten und ausschlaggebenden Gründe, warum die LED-Technologie aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken ist, sind zum einen ihre lange Lebensdauer von einigen zehntausend Stunden und zum anderen ihre hohe Energieeffizienz von über 100 lm/W.

Allerdings weisen LEDs eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit auf. Anders als bei herkömmlichen Lichtquellen beeinflusst die Temperatur der aktiven Zone signifikant negativ nicht nur die Lebenserwartung der Leuchtmittel, sondern auch ihre optischen Eigenschaften, wie den Lichtstrom und die Farbe. LEDs haben in der Regel eine vom Hersteller angegebene obere Temperaturgrenze, die nicht überschritten werden darf. Aber auch für Temperaturen der aktiven Zone unterhalb dieser Grenze gilt: Die Lebensdauer ist umso höher, je geringer die thermische Belastung ist. Daher kommt dem effizienten Thermomanagement der LED-

Systeme eine große Bedeutung innerhalb des Produktentwicklungsprozesses zu. Seine Aufgabe lässt sich sehr einfach zusammenfassen: Die in Wärme umgesetzte Verlustleistung der LED soll wirksam in die Umgebung abgeführt werden, damit die zulässigen Temperaturen unter den zu erwartenden Beanspruchungen eingehalten werden.

Die Zuverlässigkeit der LED-Produkte wird dabei stark durch die Herstellungstechnologie beeinflusst. Die Verkettung von Material, Herstellungsprozess und Bauteilfunktion ist deshalb ein entscheidender Aspekt bei der Entwicklung der Systeme [1]. Darüber hinaus muss auch die spätere Anwendung berücksichtigt werden. Eine hohe Zuverlässigkeit der LED-Produkte kann nur unter Berücksichtigung der an die Anwendung angepassten optischen Systeme, geeigneter Aufbau- und Verbindungstechniken sowie geeignetem Thermomanagement und Ansteuerelektronik erreicht werden.

Die in den meisten Unternehmen etablierten Entwicklungsprozesse weisen allerdings große Mängel hinsichtlich der funktionalen Auslegung des Thermomanagements auf. Obwohl der Nutzen eines Thermomanagementprozesses allgemein anerkannt ist, stecken in seiner transparenten und effizienten Umsetzung noch große Potenziale. Trotz der bestehenden energetischen Wechselwirkungen im LED-System und dem engen Zusammenspiel der einzelnen Systemkomponenten erfolgt die thermische Auslegung immer noch getrennt und relativ isoliert von den anderen Fachdisziplinen [2, 3]. Es fehlt in erster Linie an einer systematischen Verzahnung der für die fehlerfreie Funktionalität des Thermomanagements relevanten Disziplinen, wie der Optik, des Thermomanagements und der Elektrotechnik mit der ingenieurwissenschaftlichen Vorgehensweise in der Produktentwicklung.

Diese Problematik führt zu der Notwendigkeit, den Entwicklungsprozess qualitativ hochwertiger LED-Systeme methodisch zu unterstützen. Der geeignete Ansatzpunkt liegt in einem Vorgehensmodell, das als Leitfaden für die Entwickler dient. Dieses Vorgehen muss die zu beachtenden Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Entwicklungsdisziplinen beinhalten und diese so miteinander kombinieren, dass das Synergiepotential nutzbar gemacht wird. Weiterhin fehlen den Entwicklern Methoden und Richtlinien zur Beherrschung der thermischen Dimensionierung. Insgesamt bedarf es einer Systematik, die den Entwicklungsprozess strukturiert und darin geeignete Methoden und Werkzeuge des Thermomanagements einordnet.

1.1 ZIELSTELLUNG UND ABGRENZUNG

Ziel dieser Arbeit ist eine Systematik für die funktionale Auslegung des Thermomanagements qualitativ hochwertiger LED-Systeme in der Allgemeinbeleuchtung. Sie soll eine zielgerichtete und systematische Entwicklung neuer Lösungen ermöglichen.

Die Entwicklungssystematik soll – ausgehend von den Systemanforderungen, ersten Systemzielen und einer funktionalen Systembeschreibung – die domänenübergreifende Entwicklung unterstützen, indem detaillierte Tätigkeitsbeschreibungen im Sinne von Leitfäden den Phasen zugeordnet sowie Methodenempfehlungen gegeben werden. Die Beschreibung der Hilfsmittel ist jedoch auf den Bereich der passiven Entwärmung beschränkt, da aufgrund der Lüfterflügelrotation die akti-

ven Entwärmungskonzepte für das menschliche Ohr hörbare Luftbewegungen erzeugen, die in viele Anwendungsbereiche in der Allgemeinbeleuchtung nicht erwünscht sind.

1.2 STRUKTURELLER AUFBAU

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert. Im Anschluss an diese Einleitung wird in Kapitel 2 der Stand der Technik analysiert. Dabei wird auf die aktuelle Entwicklung der LED-Systeme in der Allgemeinbeleuchtung und die thermischen Eigenschaften von LEDs eingegangen. Zuletzt werden die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen der Wärmeübertragung und der Berechnung der Chiptemperatur erläutert.

In Kapitel 3 werden zunächst die Anforderungen im Hinblick auf Prozesse formuliert und analysiert, um eine disziplinübergreifende Entwicklung effektiv und effizient durchführen zu können. Anschließend wird das Gesamtkonzept zur Beherrschung der Komplexität und Erhöhung der Transparenz innerhalb der Entwicklung von LED-Systemen vorgestellt. Dieses bildet den methodischen Rahmen in den sich diese Arbeit einbettet.

Kern der Arbeit bildet Kapitel 4. In diesem wird die Entwicklungssystematik zur funktionalen Auslegung des Thermomanagements von LED-Systemen in der Allgemeinbeleuchtung beschrieben. Ausgangspunkt ist eine Beschreibung der domänenübergreifenden Prinzipiellösung. Dabei werden insbesondere die einzelnen Schritte und Wechselwirkungen in-

nerhalb des Entwicklungsprozesses des Thermomanagements betrachtet. Eine Klassifizierung existierender Methoden und Ansätze ermöglicht dabei eine systematische Einordnung in unterschiedliche Bereiche und zeigt Ansatzpunkte für Verbesserungen auf. Die Systematik betrachtet technische, organisatorische und informative Aspekte des Entwicklungsprozesses.

Kapitel 5 widmet sich dem Toleranzvergabeprozess. Im Vordergrund steht dabei das Aufstellen und Verifizieren einer analytischen Funktion, die den Zusammenhang zwischen technologisch bedingten Oberflächenkennwerten und fehlerfreier Funktionalität des Thermomanagements herstellt. Im Anschluss wird eine Methode zur Analyse des Wärmetransports an der Kontaktstelle ohne ausführliche Kenntnisse über den Verbindungsaufbau und die fertigungsbedingten Toleranzen vorgestellt.

Die Validierung der Arbeit erfolgt in Kapitel 6. Anhand zweier Demonstratoren wird die durchgängige Anwendung der erarbeiteten Entwicklungssystematik gezeigt. Die Demonstratoren sind so gewählt, dass die Erfüllung der aufgestellten Anforderungen und der Nutzen der Entwicklungssystematik validiert werden können.

Den Abschluss bilden eine Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte dieser Arbeit sowie ein Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten.

Kapitel 2

STAND DER WISSENSCHAFT

Das folgende Kapitel soll ein grundlegendes Verständnis darüber erzeugen, wie qualitativ hochwertige LED-Systeme prinzipiell zu entwerfen sind. Hierzu werden zu Beginn wichtige Begriffe erläutert. Anschließend werden die Funktionsweise einer LED und die physikalischen Grundlagen ihrer Lichtstromdegradation erklärt. Darauf werden die wichtigen elektrischen Kenngrößen einer LED und der Einfluss der Temperatur auf diese erläutert. Anschließend werden die verschiedenen Wärmestrommechanismen vorgestellt und die Bezeichnungen von verschiedenen Temperaturen im LED-System definiert. Des Weiteren wird gezeigt, wie die Wärmepfade und die Chiptemperatur für zeitunabhängige und für zeitabhängige Probleme mittels thermischer Netzwerke berechnet werden kann. Abschließend werden die Grundlagen numerischer Approximationstechniken für detaillierte Analyse der thermischen Vorgänge im System am Beispiel der Finite-Elemente-Methode erläutert.

Einige der folgenden Abschnitte stellen nicht nur den Stand der Technik, sondern auch Grundlagen dar, auf denen aufgebaut wird. Aus diesem Grund sind sie teilweise ausführlich erläutert.

2.1 BEGRIFFSDEFINITION UND EINORDNUNG

2.1.1 PRODUKTLEBENSZYKLUS

In der vorliegenden Arbeit wird ein bestimmter Ausschnitt aus dem Produktlebenszyklus betrachtet. Zur Einordnung soll deshalb zuerst eine Erläuterung des Begriffs Produktlebenszyklus erfolgen. In der Wissenschaft existieren mehrere unterschiedliche Interpretationen dieses Begriffs [4, 5]. Im Allgemeinen versteht man darunter die Abfolge von Situationen, die das eigentliche Produkt innerhalb eines Unternehmens durchläuft.

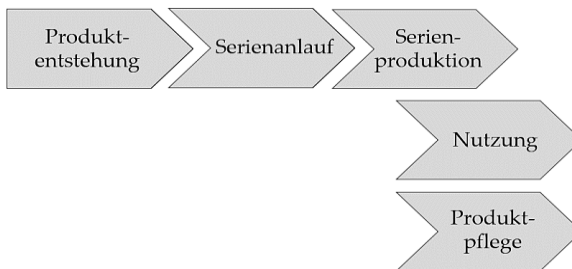


Abbildung 2.1: Fünf Phasen des Produktlebenszyklus von Serienprodukten [6]

Ein typischer Lebenszyklus für ein Produkt besteht aus fünf Phasen, die in Abbildung 2.1 dargestellt sind. Diese sind die Produktentstehung, der Serienanlauf, die Serienproduktion, die Nutzung und schließlich die Produktpflege. Im Gegensatz zu den ersten drei Phasen, die sequentiell ablaufen, finden die Nutzung der Produkte auf der Abnehmerseite und die

Produktpflege seitens des Abnehmers zeitlich parallel zur Serienproduktion statt. Der Grund hierfür liegt darin, dass für das Unternehmen mit der Markteinführung eine Gewährleistungszeit beginnt. Erst danach endet der Lebenszyklus des Produktes für das Unternehmen [6].

Des Weiteren gliedert sich die Phase der Produktentstehung nach [7] in weitere drei Phasen: strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung. Diese werden in Zyklen durchgelaufen, wie in Abbildung 2.2 dargestellt.

Die strategische Produktplanung besteht dabei aus den Aufgabenbereichen Potentialfindung, Produktfindung, Geschäftsplanung und Produktkonzipierung. Ihr Ziel ist eine erfolgversprechende Produktkonzeption, die die grundsätzlichen strategischen Unternehmensentscheidungen unterstützt. Die Konzeption der Produkte muss dabei immer marktgerecht, kostengerecht, leistungsgerecht, produktionsgerecht, anwendergerecht und zeitgerecht sein. Gleichzeitig müssen die vorhandenen Möglichkeiten eines Unternehmens hinsichtlich ihrer Entwicklungskapazitäten, Entwicklungskompetenz, Produktionskapazitäten und Vermarktungskompetenz berücksichtigt werden [7].

Eine erfolgversprechende Produktkonzeption dient in der nachfolgenden Phase der Produktentwicklung als Ausgangsbasis für den domänenspezifischen¹ Entwurf und die entsprechende Ausarbeitung. Die einzelnen Ergebnisse werden dann zu einem Gesamtsystem integriert [8].

¹ Domänenspezifisch sind die Entwicklungsvorgehensweisen, -methoden, -ergebnisse etc. bezeichnet, die in einer bestimmten technischen Domäne entstanden und dort gebräuchlich sind [92].

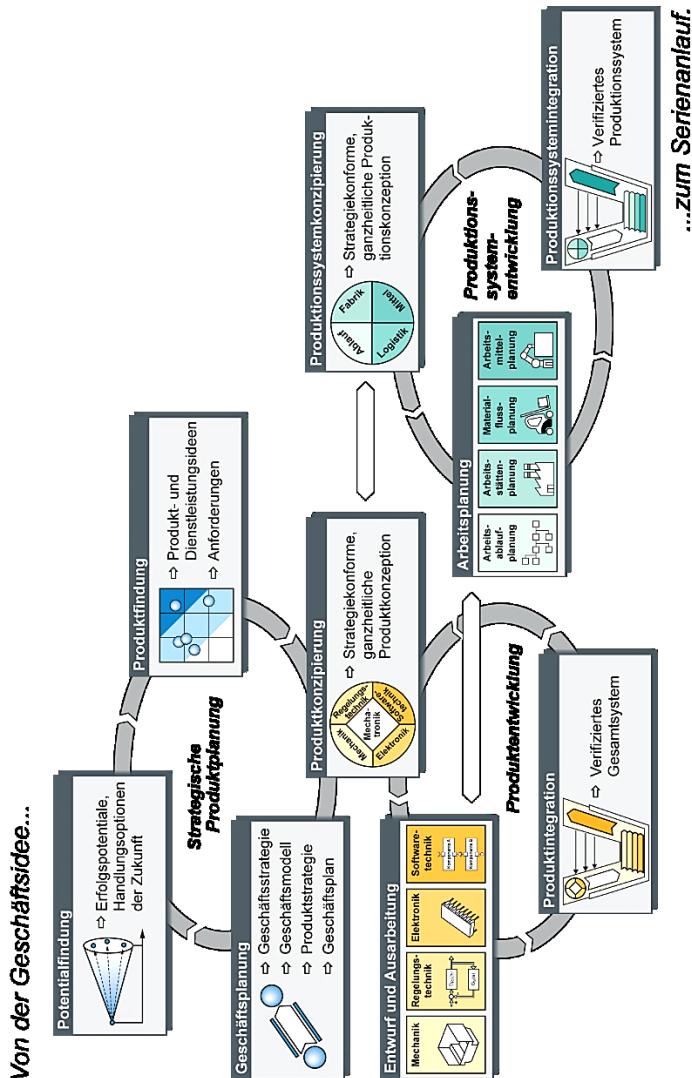


Abbildung 2.2: Das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung nach [7]

Das Ziel der Produktentwicklung ist ein verifiziertes Gesamtsystem bzw. Produkt. Die Produktentwicklung beinhaltet die Aufgabenbereiche Produktkonzipierung, Entwurf und Ausarbeitung, sowie Produktintegration. Nach der Produktentwicklung erfolgt die Produktionssystementwicklung. Hier erfolgt im Wesentlichen die Fertigungs- und Arbeitsmittelplanung. Basierend auf einer Konzipierung des Produktionssystems finden die Arbeitsablauf-, Arbeitsmittel- und Arbeitsstättenplanung sowie die Planung der Produktionslogistik (insbesondere Materialflussplanung) statt. Das Ergebnis ist ein verifiziertes Produktionssystem [7].

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die mittlere Phase der Produktentstehung, die Produktentwicklung. Die strategische Planung und die Produktionssystementwicklung werden nicht betrachtet.

2.1.2 SYSTEMATIK

Wie bereits erwähnt ist das Ziel dieser Arbeit eine Systematik zur Entwicklung der LED-Systeme. Dabei entsteht ein umfangreiches Rahmenwerk, das den Anwender mit der Bereitstellung eines Vorgehensmodells sowie dedizierten Hilfsmitteln zur erfolgreichen Umsetzung der Entwicklung technischer Systeme unterstützt. Die Entwicklungssystematik ermöglicht weder ein automatisiertes Entwickeln noch ist sie ein Ersatz für die kreative Leistung des Anwenders.

Der Begriff Entwicklungssystematik grenzt sich in zwei Punkten von dem Begriff Entwicklungsmethodik ab. Zum einen fließen in eine Entwicklungsmethodik denk- und arbeitspsychologische Untersuchungen

ein. Zum anderen betrachtet die Entwicklungsmethodik zusätzlich organisatorische Aspekte [5]. Beide Punkte fehlen in einer Entwicklungssystematik.

2.2 LED-SYSTEME IN DER ALLGEMEINBELEUCHTUNG

In den letzten Jahren verdrängen die LEDs zunehmend herkömmliche Leuchtmittel. Die stärksten Wachstumstreiber sind dabei in den Bereichen der Allgemeinbeleuchtung, wie etwa Straßen- oder Dekorationsbeleuchtung, aber auch der Automobilbeleuchtung zu sehen [9, 10]. Viele dieser Anwendungen setzen hinsichtlich der maximalen Lichtausbeute hohe Maßstäbe, weshalb verstärkt sogenannte Hochleistung-LEDs eingesetzt werden. In diese Kategorie fallen LEDs mit einer Leistungsaufnahme von über 1 W.

Die Temperatur beeinflusst nahezu alle Parameter der LED, sodass die Forderung nach immer leistungsfähigeren LED-Systemen bei gleichzeitig begrenztem Bauraum hohe Ansprüchen an das thermische Management stellt. Deswegen werden im Folgenden nach der Beschreibung grundlegender Funktionsweise einer LED ihre thermischen Abhängigkeiten erklärt. Darauf aufbauend wird die Bedeutung des Zusammenwirkens der verschiedenen Disziplinen im Entwicklungsprozess der LED-Systeme erläutert.

2.2.1 FUNKTIONSWEISE

Bei konventionellen Lampen entsteht sichtbares Licht entweder als Nebenprodukt bei der Erwärmung von Metallwendeln oder durch Umwandlung des in einer Gasentladung erzeugten ultravioletten Strahlungsanteils. Bei den LED findet die Lichterzeugung in mehreren Schichten halbleitenden Materials statt, die aufgrund eines elektrischen Feldes zum Leuchten angeregt werden. Dabei wird abhängig vom halbleitenden Material Licht in einer bestimmten Farbe (Gelb, Orange, Rot, Grün, Blau) erzeugt.

Das schmalbandige, monochromatische Licht der LED entsteht im Übergangsbereich (Sperrschicht) zwischen dem Elektronenüberschuss der n-leitenden und dem Elektronenmangel der p-leitenden Schicht des Halbleiterkristalls. Wird eine Gleichspannung angelegt, rekombinieren die Ladungsträger. Kommt es dabei zur Emission eines Photons, spricht man von einer strahlenden Rekombination. Die Wellenlänge und somit die Farbe des bei der Rekombination ausgesendeten Photons hängt dabei vom Bandabstand ab, der selber von Kristallaufbau des Halbleiters und von der Dotierung abhängig ist.

Eine nichtstrahlende Rekombination findet dagegen unter Aussendung von Phononen (quantisierte Gitterschwingungen) statt, die zu Wärmeentwicklung führen. Da dieser Prozess nicht zur Lichtaussendung beiträgt, ist er der in Leuchtdioden unerwünschte Rekombinationsmechanismus.

Ein wichtiges Merkmal von Halbleiterlichtemittern ist die Dioden-Kennlinie (UI-Kennlinie), die den Strom in Abhängigkeit von der angelegten

Spannung an der Diode beschreibt. In einem idealen pn-Übergang lässt sich der Diodenstrom I_D über die Shockley-Gleichung beschreiben [11]:

$$I_D(U) = I_S \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U}{k_b \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

mit I_S dem Sättigungsstrom der Diode, q der Elementarladung, U der Vorwärtsspannung der Diode, k_b der Boltzmannkonstante und T absoluter Temperatur. Abbildung 2.3 verdeutlicht diese exponentielle Abhängigkeit der Vorwärtsstromstärke von der Vorwärtsspannung. Außerdem ist es deutlich zu erkennen, dass sich die UI-Kennlinie dieser LED bei steigender Chiptemperatur hin zu kleineren Vorwärtsspannungen verschiebt.

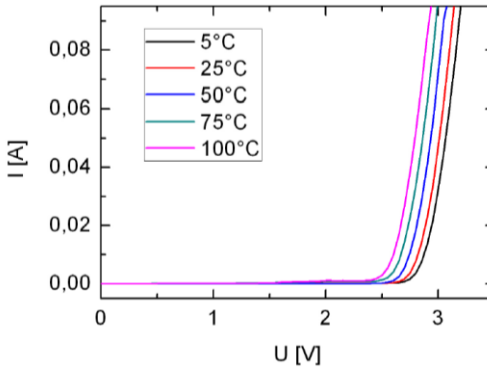


Abbildung 2.3: Temperaturabhängigkeitsmessung der UI-Kennlinie einer weißen LED [12]

Der Betrieb der LED kann grundsätzlich bei konstanter Vorwärtsstromstärke oder konstanter Vorwärtsspannung erfolgen. Aufgrund der exponentiellen Abhängigkeit von Strom und Spannung werden LEDs in den

meisten Anwendungen über konstante Vorwärtsstromstärke geregelt, da die LED so stabiler betrieben werden kann. Eine leichte Änderung der Chiptemperatur nach Gleichung (2.1) ruft im Betrieb mit konstanter Vorwärtsspannung eine exponentielle Änderung der Vorwärtsstromstärke hervor. Dabei wird die Lebensdauer stark negativ beeinflusst und auch die Lichtausbeute geht bei hierbei ergebender erhöhter Wärmeeinwirkung stark zurück.

Im Betrieb mit konstanter Vorwärtsstromstärke zeigt sich dagegen eine lineare Abhängigkeit der Spannung von der Chiptemperatur. Hierbei wird ein Proportionalitätsfaktor zwischen der Temperaturänderung ΔT und der Spannungsänderung ΔU bei konstantem Betriebsstrom definiert:

$$\Delta U = k \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

Dieser als Sensitivität einer LED bezeichnete Faktor k hat die Einheit $[k]=V/K$ und gilt immer nur für eine bestimmte LED, da dieser neben dem Betriebsstrom auch von Materialparametern abhängt.

2.2.2 DEGRADATION DES LICHTSTROMS

Die Emissionseigenschaften von LEDs sind nicht konstant, sie verändern sich mit der Zeit. Der Lichtstrom einer LED nimmt im Betrieb trotz konstanter Betriebsparameter und Umgebungsbedingungen kontinuierlich ab. Dieser Prozess wird als irreversible Degradation des Lichtstroms bezeichnet, da er sich nicht umkehren lässt. Dabei wird auf Grund von lang andauernder Wärmeeinwirkung der aktive Bereich des Chips immer mehr geschädigt, was die Lebenszeit der LED verkürzt.

Laut aktuellem Erkenntnisstand ist der Grund hierfür auf die Vermehrung von Fehlstellen im Kristallgitter zurückzuführen, was wiederum einer Erhöhung der Anzahl strahlungsloser Elektronenübergänge entspricht [13, 14].

Dieses Verhalten wird durch hohe Temperaturen und Stromdichten begünstigt, was zu einer weiteren Verminderung der Lebensdauer und der Leistungsfähigkeit der LED führt. Da bei einem wiederholten Absenken der Temperatur auf den Ursprungswert der Lichtstrom ebenfalls wieder auf den Ursprungswert ansteigt, wird diese Lichtstromdegradation als reversible thermische Degradation bezeichnet. Die Temperaturabhängigkeit der LED geht auf die thermische Abhängigkeit der verschiedenen Rekombinationsraten zurück, wobei sich aus diesen keine direkte Abhängigkeit herleiten lässt [12].

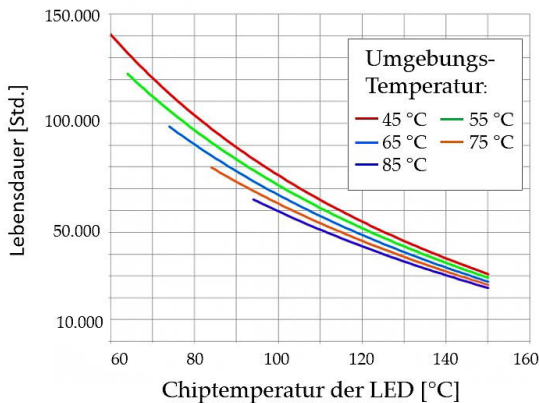


Abbildung 2.4: Lebensdauer einer weißen LED CREE XLamp XR-E für verschiedenen Umgebungstemperaturen von 45 °C bis 85 °C bei Betrieb mit 350 mA [9]

Wie sich dieser Effekt auf die Lebensdauer auswirkt, kann man in Abbildung 2.4 sehen. Ab einer bestimmten Chiptemperatur beginnt die Lebensdauer zu sinken. Je größer der Umgebungstemperatur bei gleicher elektrischen Leistung ist, desto größer ist die durchschnittliche Temperatur der aktiven Zone der LED. Eine daraus folgende Erwärmung des LED Chips führt zu einer Abnahme der abgegebenen Lichtmenge und einer Veränderung der Lichtfarbe.

2.2.3 GRUNDSTRUKTUR EINES LED-SYSTEMS

Der Begriff System bezeichnet im Allgemeinen eine Anordnung von Elementen, die miteinander wechselwirken. Der Grundbaustein eines Systems ist ein Element, das auch als Teil, Komponente oder Gebilde bezeichnet werden kann. Ein Element kann wiederum ein System sein. Die Elemente sind durch Beziehungen miteinander oder mit ihrer Umgebung verknüpft und stehen dadurch in Wechselwirkung zueinander [15].

Im Folgenden wird der Aufbau eines LED-Systems beispielhaft an einem LED-Retrofit-System erläutert. Unter einem LED-Retrofit bezeichnet man ein Leuchtmittel, das zur Nutzung in vorhandenen Leuchten oder mit etablierten konventionellen Fassungen konzipiert ist.

Ein LED-Retrofit-System ist bei Auslieferung bereits komplett betriebsbereit und besteht hauptsächlich aus LEDs, einem Kühlkörper, einer Vorschalt elektronik und einem Sockel. Der Sockel eines LED-Retrofit-Systems dient dazu, es in einer Lampenfassung zu fixieren und elektrisch zu kontaktieren. Die Ausführung der Fassung beschränkt über eine Strombegrenzung an die Netzspannung die zulässige Leistung und

Stromaufnahme der darin betreibbaren Lichtquelle. Diese Vorschaltbauteile ermöglichen dabei eine geeignete konstante Stromquelle für die in Reihe geschalteten LEDs. Der Kühlkörper verbessert dabei die Wärmeabgabe durch die Vergrößerung der Wärmeübergangsflächen an die Umgebung. Je nach Hersteller sind Reflektoren oder Linsen mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften zur Verbesserung der Lichtabstrahlung in LED-Retrofit-Systemen eingesetzt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein LED-Retrofit-System aus mehreren elektronischen und mechanischen Systemelementen sowie elektrischen, mechanischen und thermischen Schnittstellen besteht. Die Beziehungen zwischen denen können dabei mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik beschrieben werden. Dieser besagt, dass die Änderung der inneren Energie eines thermodynamischen Systems während eines Prozesses nur von den über die Systemgrenzen ausgetauschten Energieströmen verursacht wird und Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann. Bedingt durch die Funktionsweise der LED verlässt die von außen (über die Systemgrenzen hinein) zugeführte elektrische Energie W_e die Systemgrenzen einerseits als Strahlung emittierte optische Energie W_o und andererseits als thermische Energie W_{th} .

$$W_e \approx W_o + W_{th} \quad (2.3)$$

Weitere Energieformen, die in Gleichung (2.3) nicht aufgeführt sind, sind die Volumenarbeit und die Oberflächenarbeit. Da deren Energiebetrag zur Energiebilanz aber nicht wesentlich beiträgt, werden diese Energieformen im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt. Folglich kann die thermische Energie unter Berücksichtigung der Energieerhaltung wie folgt berechnet werden [16]:

$$W_{th} = W_e - W_o \quad (2.4)$$

Über Systemgrenzen hinweg transportierte thermische Energie bezeichnet man als Wärmeenergie Q (auch Wärmemenge oder umgangssprachlich Wärme). Sie gibt im Allgemeinen damit an, wie viel thermische Energie ein Körper auf einen anderen überträgt. Gibt ein Körper Wärmeenergie ab, so verringert sich seine thermische Energie, und umgekehrt.

Bei Temperaturdifferenzen fließt die Wärmeenergie von den Stellen mit höherer Temperatur zu Stellen niedriger Temperatur, es fließt ein Wärmestrom \dot{Q} . Da dieser Wärmestrom die in einer Zeiteinheit transportierte Wärme Q ist, ist er folglich eine Leistung mit der Einheit $[\dot{Q}] = \text{W}$.

In LEDs fällt der Wärmestrom als Verlustleistung P_{th} an. Diese resultiert nach Gleichung (2.4) aus der Differenz zwischen der Leistungsaufnahme dieser LED und der über Systemgrenzen gewünschten abgegebenen Leistung. Sie ist daher ein unerwünschter Teil der Leistung, der in dem betrachteten System in einen Wärmestrom umgesetzt wird. Da von einer LED im Gegensatz zu Glühlampen, die ein kontinuierliches Spektrum aussenden, ausgestrahlte elektromagnetische Strahlung eine bestimmte Wellenlänge und damit eine bestimmte Farbe hat, ist die ganze optische Leistung die gewünschte Leistung.

Auch wenn LEDs mit ca. 20% bis 40% mehr als dreifach so viel Energie in elektromagnetische Strahlung umwandeln wie die klassische Glühlampe, müssen immer noch mindestens 60% der zugeführten elektrischen Leistung in Form von Wärme abgeführt werden. Diese Dissipation führt zu einem Anstieg der Temperatur im LED-System, bis sich ein Gleichgewicht zwischen der elektrisch erzeugten Verlustleistung P_{th} und dem

ständig abgeführten Wärmestrom \dot{Q} einstellt. Je effizienter diese Abführung erfolgt, umso geringer ist die sich ergebende Temperaturerhöhung im System.

2.3 WÄRMEÜBERTRAGUNG IM LED-SYSTEM

Dieses Unterkapitel behandelt die Grundlagen, die für das Verständnis der Arbeit von Bedeutung sind. Dabei werden die physikalischen Grundlagen vorgestellt und in ihrer Bedeutung für die Entwärmung von LED-Systemen erläutert.

2.3.1 DIE WÄRMEÜBERTRAGUNGSMECHANISMEN

Als Wärmeübertragung bezeichnet man den Transport thermischer Energie infolge eines Temperaturunterschiedes über Systemgrenzen hinweg. Die physikalische Größe der Wärmeübertragung ist der Wärmestrom \dot{Q} . Die Wärmeübertragung kann auf drei Arten erfolgen: die Wärmeleitung, die Konvektion und die Wärmestrahlung.

DIE WÄRMELEITUNG

In einem Festkörper kann Wärme zwischen benachbarten Atomen oder Molekülen unter der Wirkung eines Temperaturgradienten transportiert werden. Der Zusammenhang zwischen einem Temperaturgradienten ∇T und der daraus folgenden Wärmestromdichte beschreibt das Fourier-Gesetz [17]:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (2.5)$$

Das negative Vorzeichen weist darauf hin, dass es sich hier um die vom System abgegebene Wärme handelt. Die Proportionalitätskonstante λ nennt man Wärmeleitfähigkeit oder spezifische thermische Leitfähigkeit. Diese in $[\lambda]=\text{W/mK}$ angegebene wichtige Größe für die Wärmeleitung ist eine spezifische Eigenschaft der Stoffe, d. h. sie ist eine Stoffkenngröße. So haben Metalle meist große Wärmeleitfähigkeiten, die sich in der Größenordnung von einigen 100 W/mK befinden. In Metallen wird Wärme zusätzlich zu Gitterschwingungen auch durch Elektronen transportiert. Um zwei bis drei Größenordnungen schlechtere Leitfähigkeit haben Isolatoren, wie zum Beispiel Glas, Holz, Kunststoffe, bei denen die Wärmeleitung über Elektronen fast vollständig unterbunden ist. In Tabelle 2.1 sind die Wärmeleitfähigkeiten einiger ausgewählter Stoffe aufgelistet.

Der Wärmestrom, der bei der Wärmeleitung durch Fläche A senkrecht zur Richtung des Wärmestroms fließt, lässt sich über die Gleichung:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.6)$$

beschreiben, in der $\Delta T/\Delta x$ der lokale Temperaturgefälle ist. Unter der Annahme zweier Flächen mit jeweils konstanter Temperatur wird ein thermischer Widerstand R_{th} zwischen diesen beiden Flächen wie folgt definiert [17]

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad (2.7)$$

Tabelle 2.1: Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Materialien bei 20°C [18, 19, 20]

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Silber	419
Kupfer, rein	390
Aluminium, rein	237
Aluminiumnitrid-Keramik	110
Galliumarsenid	50,0
Aluminiumoxid-Keramik	24
Quarzglas	1,45
Wasser	0,6
Gummi	0,13 ... 0,24
Acryl, Plexiglas	0,18
Luft	0,026

Der thermische Widerstand ist ein Maß für die Fähigkeit eines wärmeleitenden Körpers, Wärmeübertragung zu widerstehen, und kann aus seinen geometrischen Bedingungen bestimmt werden. So ergibt sich der thermische Widerstand eines wärmeleitenden Körpers der Dicke d , der Querschnittsfläche A und der konstanten Wärmeleitfähigkeit λ zu

$$R_{th} = \frac{d}{\lambda \cdot A} \quad (2.8)$$

Um einen möglichst geringen thermischen Widerstand zu erzielen, sind folglich möglichst kleine Dicken, große Querschnittflächen und große Wärmeleitfähigkeiten erforderlich.

Da in der Praxis reelle Systeme aus mehreren Komponenten mit unterschiedlichen Geometrien, Materialien und damit thermischen Widerständen bestehen, bietet sich die Beschreibung über den thermischen Gesamtwiderstand $R_{th\,Ges}$ eines mehrschichtigen Systems an. Sind die thermischen Widerstände der Einzelschichten in Serie geschaltet, addieren sie sich zu einem Gesamtwiderstand.

$$R_{th\,Ges} = R_{th\,1} + R_{th\,2} + \dots + R_{th\,n} = \sum_{i=1}^n R_{th\,i} \quad (2.9)$$

Zur Bestimmung des thermischen Gesamtwiderstands bei parallelgeschalteten Einzelwiderständen müssen diese dagegen invers addiert werden.

$$\begin{aligned} R_{th\,Ges} &= \left(\frac{1}{R_{th\,1}} + \frac{1}{R_{th\,2}} + \dots + \frac{1}{R_{th\,n}} \right)^{-1} = \\ &= \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{th\,i}} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (2.10)$$

DIE WÄRMESTRAHLUNG

Bei Wärmestrahlung wird thermische Energie über elektromagnetische Wellen zwischen festen bzw. flüssigen Körpern unterschiedlicher Oberflächentemperatur transportiert. Da die Form des emittierten Spektrums für die Entwärmung von LED-Systemen keine Rolle spielt, genügt es, die Beschreibung der Wärmestrahlung auf die Beschreibung des Energieaustausches zu reduzieren. Die Strahlungsenergie, die eine Oberfläche

A eines emittierenden Körpers emittieren kann, wird über das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben [21]:

$$\dot{Q} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T^4 \quad (2.11)$$

wobei σ als Stefan-Boltzmann-Konstante mit dem Wert $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ und ε als Emissionskoeffizient der Oberfläche bezeichnet wird.

Ein Körper, der bei gleicher Temperatur den Maximalwert an Strahlungsenergie erreicht, wird schwarzer Strahler mit dem dimensionslosen Emissionskoeffizient $\varepsilon=1$ genannt. Dabei handelt es sich einerseits um einen idealen Strahler, dessen spezifische Ausstrahlung von anderen Körpern gleicher Temperatur nicht übertroffen werden kann. Andererseits ist er auch ein idealer Absorber. Bei realen Körpern dagegen handelt es sich um sogenannte graue Strahler, bei denen der Emissionskoeffizient Werte zwischen Null und Eins besitzt.

Der Emissionskoeffizient ist abhängig vom Material, der Oberflächentemperatur und dem Zustand der Oberfläche. Bei elektrisch leitenden Materialien ist der Emissionskoeffizient viel kleiner als der bei elektrisch isolierenden Materialien. Da nur eine dünne Schicht an der Oberfläche des Materials am Strahlungsaustausch teilnimmt, werden die Strahlungseigenschaften im Wesentlichen durch die Beschaffenheit der Oberfläche bestimmt. Verunreinigte und oxidierte Oberflächen weisen einen höheren Emissionskoeffizienten als polierter Oberflächen auf. In Tabelle 2.2 sind die Auswirkung und die daraus folgende Möglichkeit des Verstärkens oder Verringerens der Wärmestrahlung am Beispiel des Aluminiums gezeigt. Um die spezifische Ausstrahlung realer Strahler zu erfassen, wird

ein Korrekturfaktor eingeführt, der material- und oberflächenabhängige Emissionsgrad $\varepsilon(\lambda, T)$.

Tabelle 2.2: Emissionskoeffizienten von Aluminium mit verschiedenen Oberflächen [21]

Stoff	Emissionskoeffizient
Lackiertes Aluminium	>0,95
Angerautes Aluminium	0,83... 0,94
Unbehandeltes Aluminium	0,68
Poliertes Aluminium	0,04

Gleichzeitig mit der Emission von Wärmestrahlung findet auch die Absorption thermischer Strahlung statt. Den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption stellt das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz für ein realer Körper im thermischen Gleichgewicht wie folgt her [22]:

$$a(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T). \quad (2.12)$$

Die Strahlung, die auf einen realen Körper trifft, wird zum Teil reflektiert, zum Teil absorbiert und unter Umständen zum Teil transmittiert. Es wird bei diesen Anteilen vom Reflektionsgrad $r(\lambda, T)$ vom Absorptionsgrad $a(\lambda, T)$ und vom Transmissionsgrad $\tau(\lambda, T)$ gesprochen. Diese drei Größen hängen von der auftreffenden Wellenlänge ab. Dabei gilt das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz:

$$a(\lambda, T) = 1 - r(\lambda, T) - \tau(\lambda, T) \quad (2.13)$$

Mit den Gleichungen (2.1) wird die Energiebilanz einer Oberfläche A der Temperatur T_1 , die gegen eine Umgebung der Temperatur T_2 strahlt, ausgedrückt durch:

$$\dot{Q} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.14)$$

Analog zur Wärmeleitung lässt sich auch bei der Wärmestrahlung ein thermischer Widerstand definieren.

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\dot{Q}} = \frac{T_1 - T_2}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)} \quad (2.15)$$

Um einen möglichst großen Wärmestrom durch Strahlung zu erzielen, sind folglich ein möglichst hoher resultierender Emissionsgrad und eine große wärmeabgebende Oberfläche erforderlich. Weiterhin ist offensichtlich, dass der Effekt der Wärmestrahlung durch eine hohe Temperaturdifferenz zwischen dem Strahler und der aufnehmenden Umgebung begünstigt wird.

Für die Entwärmung von LED-Systemen ist die Wärmestrahlung von besonderer Bedeutung, da die über elektromagnetische Wellen transportierte Energie vom Umgebungsmedium aufgenommen und in Arbeit umgesetzt wird. Dabei ergeben sich durch lokale Temperaturunterschiede entsprechende Dichteunterschiede im Umgebungsmedium. Als Folge wird eine Strömung durch den damit verbundenen Auftrieb der wärmeren Bereiche hervorgerufen. Dieses Wärmeübertragungsmechanismus wird als Konvektion bezeichnet.

DIE KONVEKTION

Konvektion ist die Wärmeübertragung in Flüssigkeiten und Gasen, wobei makroskopische Teilchenbewegungen durch das Fluid Wärme in Form von innerer Energie mittransportiert. Die Bewegungen können aufgrund von Dichte, Temperatur- und Konzentrationsunterschieden im

Fluid erfolgen oder durch eine äußere Kraft wie z. B. Lüfter hervorgerufen werden. Im ersten Fall wird von freier Konvektion, im zweiten Fall von erzwungener Konvektion gesprochen.

Für die Entwärmung von LED-Systemen ist der Übergang von thermischer Energie eines Festkörpers in ein Fluid von besonderer Bedeutung, da dieser Prozess die Entwärmung über einen Kühlkörper beschreibt. Dabei kann der Wärmeübergang von diesem Festkörper mit der Außenfläche A und der Temperatur T_W auf ein Fluid der Temperatur T_F über das Newton'sche Abkühlungsgesetz beschrieben werden:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_F - T_W) \quad (2.16)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α mit der Dimension $[\alpha]=\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ berücksichtigt dabei das Wärmeübergangsverhalten in der Grenzschicht (Grenzschichttheorie nach Prandtl), welches in hohem Maße von der dort herrschenden Strömung abhängt. Direkt an der Wand ist die Strömungsgeschwindigkeit durch die sogenannte Wandhaftbedingung gleich null. Hier findet ausschließlich Wärmeleitung statt. Bei größer werdender Entfernung zur Oberfläche kommen jedoch Mischungsvorgänge zum Tragen, welche den linearen Temperaturverlauf in einen nichtlinearen übergehen lassen.

Der Wärmeübergangskoeffizient α ist eine lokale Größe und kann an jeder Stelle der Wand verschieden sein. Er ist deshalb keine Materialkonstante wie die Wärmeleitfähigkeit, sondern abhängig von der Umgebung wie zum Beispiel den Fluideigenschaften, der Strömungsgeschwindigkeit, der Art der Strömung oder der Geometrie. Die Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten ist für technische Bauteile sehr schwierig und vielfach nur empirisch möglich. Nur für einfache Modelle, wenn sich

der Aggregatzustand des Fluides nicht ändert, lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient durch Lösung der grundlegenden partiellen Differentialgleichungen für das Geschwindigkeits- und Temperaturfeld exakt berechnen [23]. Im VDI-Wärmeatlas [24] sind empirisch ermittelte Berechnungsansätze für einfache Geometrien gegeben. Tabelle 2.3 zeigt eine Übersicht über typische Größenordnungen des Wärmeübergangskoeffizienten bei freier und erzwungener Konvektion.

Tabelle 2.3: Typische Werte des Wärmeübergangskoeffizienten in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ für Gase und Flüssigkeiten in freier und erzwungener Konvektion [25]

	Gase	Flüssigkeit
Freie Konvektion	3... 20	100... 600
Erzwungene Konvektion	10... 100	500... 10000

Um den Zeit- und Mittelaufwand für die experimentell zu ermittelnden Wärmeübergangskoeffizienten zu verringern, wird auf die Ähnlichkeitstheorie zurückgegriffen. Sie besagt, dass sich Wärmeübergangsprobleme, die gleiche Werte für die charakteristischen dimensionslosen Kennzahlen aufweisen, auch physikalisch ähnlich verhalten. Diese Kennzahlen beschreiben die Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder. Sie lassen sich aus den gewählten charakteristischen Größen Länge L , Geschwindigkeit u und Temperaturdifferenz ΔT sowie aus den Fluideigenschaften Dichte ρ , dynamische Viskosität η , kinematische Viskosität ν , Wärmeleitfähigkeit des Mediums λ und der spezifischen isobaren Wärmekapazität c_p bestimmen. Es wird zwischen abhängigen und unabhängigen Kennzahlen unterschieden [23].

Die für die rechnerische Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α wichtigste Kennzahl ist die Nusselt-Zahl Nu , die sich aus der charakteristischen überströmten Länge L der untersuchten Anordnung und der Wärmeleitfähigkeit λ des Fluids ergibt:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (2.17)$$

Sie beschreibt, wie gut der Wärmeübergang im Vergleich zur reinen Wärmeleitung im Fluid ist. Bei freier Konvektion ist die Nusselt-Zahl von zwei unabhängigen Kennzahlen abhängig:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (2.18)$$

Die Grashof-Zahl Gr ist Ausdruck des Verhältnisses von Auftrieb in einem Fluid zur wirkenden Viskositätskraft und damit entscheidend für die Ausbildung der freien Konvektion:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2} \quad (2.19)$$

mit g Fallbeschleunigung, β Volumen-Temperatur-Koeffizienten des Fluids, ΔT Temperaturdifferenz zwischen der Wand und dem anströmenden Fluid, L charakteristische Länge und ν kinematische Viskosität.

Die Prandtl-Zahl Pr ist das Verhältnis von kinematischer Viskosität ν und Temperaturleitfähigkeit a :

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot \eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (2.20)$$

mit der spezifischen Wärmekapazität c_p des Fluids sowie dessen Dichte η und Wärmeleitfähigkeit λ . Sie ist ein Maß für das Verhältnis von Strömungs- und thermischer Grenzschicht. Aus der kinetischen Gastheorie folgt für Gase und Dämpfe [17]:

$$Pr = 0,73 \quad (2.21)$$

Für den Wärmeübergang von einem Festkörper in ein Fluid lässt sich analog zur Wärmeleitung ebenfalls ein thermischer Widerstand definieren. Unter Benutzung von Gleichung (2.16) ergibt sich der thermische Widerstand der Konvektion zu [17]

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\dot{Q}} = \frac{1}{\alpha \cdot A} = \frac{L}{Nu \cdot \lambda \cdot A} \quad (2.22)$$

2.3.2 TEMPERATUREN IM LED-SYSTEM

Die Temperatur lässt sich mikroskopisch als die mittlere Energie der atomaren oder molekularen Bestandteile eines Gases, einer Flüssigkeit oder eines Festkörpers auffassen. Bei einem thermodynamischen System, das aus einer sehr großen Anzahl von kleinsten Teilen aufgebaut ist, ist die Beschreibung der Systemeigenschaften durch die Charakterisierung seiner einzelnen Teilchen unmöglich. Hierbei sind nicht die vielen Mikrozustände des Systems vom Interesse, sondern nur das Verhalten von makroskopisch beobachtbaren Mittelwerten. Dementsprechend ist die Temperatur die makroskopische Größe für eine stochastische Beschreibung der mikroskopischen Energien innerhalb eines betrachteten Volumens.

Bei einer LED müssen aufgrund ihres komplexen Aufbaus mehrere Temperaturen beachtet werden. Die für die Auslegung entscheidenden kritischen Temperaturen sind die Chiptemperatur T_J , die Lötpunkttemperatur T_B und die Umgebungstemperatur T_U .

Die Chiptemperatur T_J ist die durchschnittliche Temperatur der aktiven Zone der LED, an der die Photonen erzeugt und abgegeben werden. Wegen der Größe der aktiven Zone von wenigen Quadratmillimetern muss die Chiptemperatur einer LED nicht weiter unterteilt werden. Diese darf nicht mit der oft in Datenblättern angegeben maximalen Chiptemperatur $T_{J,max}$ verwechselt werden. Die maximale Chiptemperatur bezeichnet die Temperatur, bis zu der die LED vom Chiphersteller freigegeben wird.

Die Lötpunkttemperatur T_B ist die Temperatur an der LED-Lötstelle, wo der Halbleiterchip mit der Leiterplatte verbunden wird. Im Gegensatz zu der Chiptemperatur T_J lässt sie sich mit Kontaktmessungen messtechnisch erfassen. Mit dem thermischen Widerstand der LED kann folglich aus der Lötpunkttemperatur die Chiptemperatur berechnen werden.

Die Umgebungstemperatur T_U beschreibt die durchschnittliche Temperatur der Umgebung des LED-Systems für den Fall, dass in diesem System während der Temperaturbestimmung keine Leistung in Wärme umgesetzt wird. In den meisten Fällen ist jedoch die Umgebungstemperatur, die sich in unmittelbarer Umgebung des LED-Systems im Betrieb mit der Zeit einstellt, größer als die Umgebungstemperatur im ausgeschalteten Zustand. Befindet sich beispielsweise das zu betrachtende LED-Sys-

tem in einem geschlossenen Gehäuse, so ist die Innentemperatur des Gehäuses durch die Eigenerwärmung höher als die Umgebungstemperatur. Bei derartigen Systemen ist immer von der Oberflächentemperatur des Gehäuses als die Umgebungstemperatur auszugehen.

2.4 THERMISCHE MODELLIERUNG

Der thermische Pfad eines LED-Systems kann durch die Angabe des thermischen Gesamtwiderstandes $R_{th\,JU}$ charakterisiert werden. Dieser ergibt sich aus den Summen der Einzelwiderstände im Wärmepfad von der aktiven Zone zur Umgebung.

Die komplizierten thermischen Prozesse in einem LED-System sind oftmals mathematisch nur mit großem Aufwand zu erfassen. Es existiert eine Vielzahl von Verfahren, um die thermische Dimensionierung durchzuführen, die sich durch das Anwendungsgebiet sowie durch den Rechenaufwand und die Genauigkeit unterscheiden. In Abschnitt 2.4.1 wird die Wärmenetzmethode vorgestellt, ein Analogiemodell, welches dem Verständnis des Elektrotechnikers besonders entgegenkommt. Im Gegensatz zu aufwendigeren numerischen Methoden, die im Abschnitt 2.4.2 beschrieben sind, erlaubt die Wärmenetzmethode deutlich kürzere Rechenzeiten, gute Anschaulichkeit und damit umfangreiche Betrachtungen zu Parametervariationen.

2.4.1 WÄRMENETZMETHODE

Um den thermischen Pfad von der Wärmequelle bis zur Umgebung zu beschreiben, wird ein thermisches Ersatzschaltbild eingeführt. Dabei wird das thermische Verhalten des LED-Systems über ein Netzwerk aus Wärmekapazitäten, Wärmeübergangswiderständen, Wärmeleitwiderständen und Wärmequellen nachgebildet. Das thermische Ersatzschaltbild wird anschließend durch Anwendung der Theorie elektrischer Netzwerke in ein elektrisches Ersatzschaltbild umgewandelt. Durch die Beschreibung der Wärmekapazitäten durch Kondensatoren, der Wärmeübergangswiderstände durch elektrische Widerstände und der Wärmequellen durch eine Stromeinprägung in die entsprechenden Knoten erhält man ein thermisches Ersatzschaltbild, welches einem elektrischen Netzwerk vom Äußeren her entspricht, das aber das thermische Strömungsfeld in dem zu untersuchenden System abbildet. Die Analogien zwischen den entsprechenden Beziehungen sind die Tabelle 2.4 dargestellt.

Tabelle 2.4: Analogie zwischen den Größen der Elektrotechnik und der Wärmetechnik [20]

Elektrisches Netzwerk	Thermisches Netzwerk
Strom i	Wärmestrom \dot{Q}
Spannungsabfall u	Temperaturdifferenz ΔT
Widerstand R	Wärmewiderstand R_{th}
Kapazität C	Wärmekapazität C_{th}
Spezifische elektrische Leitfähigkeit δ	Wärmeleitfähigkeit λ

Dieses Verfahren zur Beschreibung der in einem System auftretenden thermischen Prozesse ist als Wärmenetzmethode bekannt. Sie bietet eine gute Anschaulichkeit und einen relativ geringen Rechenaufwand, der umfangreiche Variantenvergleiche, Parameterstudien sowie Optimierungen ermöglicht.

Um mit dem so bestimmten thermischen Gesamtwiderstand die resultierende Chiptemperatur berechnen zu können, muss der Wärmestrom bekannt sein, der durch diesen Gesamtwiderstand fließt. Dabei wird unterschieden, ob nur das thermische Gleichgewicht betrachtet werden soll oder ob auch Temperaturveränderungen mit der Zeit dargestellt werden sollen.

STATIONÄRES ERSATZSCHALTBILD

Sollen die Endtemperaturen bzw. die Temperaturverteilung der einzelnen Elemente bestimmt werden, so genügt in diesem stationären Fall ein Netzwerk, welches aus Wärmquellen, thermischen Widerständen und Temperaturdifferenzen besteht.

Der Wärmestrom wird nach dem Fourier-Gesetz vom Temperaturunterschied über dem LED-System hervorgerufen. Dieser Wärmestrom führt zu einem Anstieg der Chiptemperatur, bis sich ein Gleichgewicht zwischen dem Wärmestrom und der thermischen Verlustleistung P_{th} einstellt, die in der LED abfällt. In diesem thermisch stabilen Zustand berechnet sich die erreichte Chiptemperatur mit der Umgebungstemperatur T_U als Basistemperatur folgendermaßen:

$$T_J = P_{th} \cdot R_{th\,JU} + T_U \quad (2.23)$$

Die thermische Verlustleistung P_{th} der LED kann unter Berücksichtigung der Energieerhaltung aus der elektrischen Anschlussleistung der LED und der als Licht emittierten optischen Energie nach Gleichung (2.4) berechnet werden. Häufig wird der Anteil der emittierten optischen Energie über die Effizienz η der LED beschrieben, woraus sich folgender Ausdruck für die thermische Verlustleistung ergibt:

$$P_{th} = P_e \cdot (1 - \eta) \quad (2.24)$$

Um den thermischen Pfad von einer Wärmequelle bis zur Umgebung beschreiben zu können, wird ein thermisches Ersatzschaltbild eingeführt. Im Fall einer LED besteht das Ersatzschaltbild aus einer reinen Serienschaltung von Einzelwiderständen ($R_{th\,1}, R_{th\,2}, \dots, R_{th\,n}$), wie sie in Abbildung 2.5 (links) zu sehen ist. Das Ersatzschaltbild eines Systems mit n LEDs weist dagegen zunächst eine Folge von Parallelschaltungen von thermischen Widerständen der einzelnen LEDs ($R_{th\,LED1}, R_{th\,LED2}, \dots, R_{th\,LEDn}$), auf, und einer Serienschaltung von Einzelwiderständen im Wärmepfad von der Lötstelle zur Umgebung ($R_{th\,rest}$). Dieses Ersatzschaltbild wird durch Abbildung 2.5 (rechts) veranschaulicht.

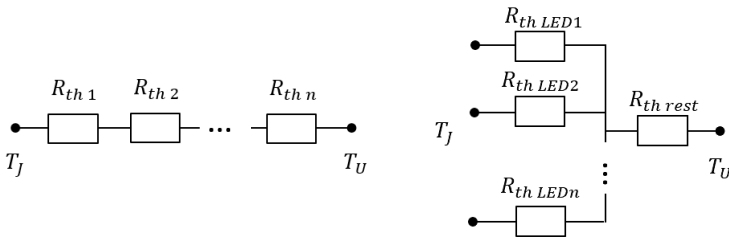


Abbildung 2.5: Ersatzschaltbild eines LED-Systems, welches nur aus einer LED (links) und welches aus vielen LEDs (rechts) besteht

NICHT STATIONÄRES ERSATZSCHALTBILD

Sind die zeitliche Änderung der Temperatur bzw. Temperaturverlauf vom Interesse, so muss das Wärmespeichervermögen der einzelnen Elemente berücksichtigt werden. Diese Eigenschaft wird in der Thermodynamik über die makroskopische Wärmekapazität C_{th} beschrieben. Diese ist das Produkt aus der Materialkonstante spezifische Wärmekapazität c_p , welche die zu speichernde Energie eines Körper beschreibt und der Masse m des Körpers [17].

$$C_{th} = c_p \cdot m \quad (2.25)$$

Entsprechend der Analogiebeziehungen aus Tabelle 2.4 entspricht die Wärmekapazität der elektrischen Kapazität eines Kondensators. Damit lässt sich die Wärmekapazität über die Änderung der Temperatur und den Wärmestrom wie folgt definieren [17]:

$$C_{th} = \frac{\dot{Q}}{\dot{T}} \quad (2.26)$$

Die Wärmekapazität ist eine Stoffeigenschaft und gibt an, wie schnell sich die Temperatur eines Körpers bei einer bestimmten Wärmezufuhr ändert.

In der Elektrotechnik ist ein zeitabhängiger Spannungsabfall von Widerstands-Kondensator-Parallelschaltungen bekannt. Eine Weiterentwicklung des zuvor gezeigten stationären Ersatzschaltbildes besteht dann in einer Erweiterung mit einer solchen Parallelschaltung mit einem Widerstand R_{th} und einem Kondensator C_{th} . Aus der Netzwerktheorie der Elektrodynamik bieten sich hierfür mit dem Forster- und Cauer-Netz zwei mögliche Netzwerke, welche in Abbildung 2.6 gezeigt sind [26]. Eine ausführliche Beschreibung hierzu findet sich in [12]. Der folgende

Abschnitt bietet eine Zusammenfassung einiger wichtiger Punkte der beiden Netzwerken vor und ist daher inhaltlich stark an [12] angelehnt.

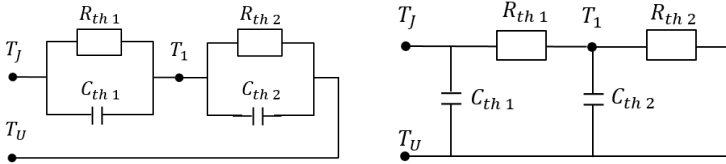


Abbildung 2.6: Übersicht der verschiedenen Ersatzschaltbilder zur Modellierung eines thermischen Systems: Foster-Netzwerk (links) und Cauer -Netzwerk (rechts) [26]

Beim Forster-Netz koppeln die Wärmekapazitäten immer an das Potentialniveau des nächsten thermischen Widerstands an. Beim Aufstellen der Differentialgleichung des Forster-Netzes mit n RC-Gliedern ergibt sich eine Differentialgleichung 1. Ordnung [26]. Diese sind analytisch lösbar. Die einzelnen Widerstände, Kapazitäten oder Knotenpunkte haben keine physikalische Bedeutung und dürfen somit nicht einem Teil des Systems zugeordnet werden. Dies ist ersichtlich an der Tatsache, dass das Vertauschen zweier RC-Glieder erlaubt ist, weil das mathematische Ergebnis unverändert bleibt. Physikalisch gesehen wäre es aber nicht das gleiche System.

Das physikalisch richtige Netzwerk ist das Cauer-Netz. In diesem Netzwerk koppeln alle Wärmekapazitäten gegen die Umgebungstemperatur. Beim Aufstellen der Differentialgleichung des Cauer-Netzes mit n RC-Gliedern ergibt sich eine Differentialgleichung n . Ordnung, die im Allgemeinen nicht mehr analytisch lösbar ist [26].

Foster- und Cauer-Modell sind äquivalente Beschreibungen eines RC-Eintores. Man kann das Foster-Modell in die Cauer-Form umwandeln und umgekehrt. Die Temperaturantwort des Systems lässt sich nun durch folgende Lösung des Foster-Modells beschreiben:

$$\Delta T_J(t) = P_{th} \cdot \sum_{i=1}^n R_{th,i} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad (2.27)$$

Die thermische Zeitkonstante τ_i berechnet sich aus dem Produkt vom thermischen Widerstand und der thermischen Kapazität.

$$\tau_i = C_{th,i} \cdot R_{th,i} \quad (2.28)$$

Für die Temperaturerhöhung an der aktiven Zone der LED nach dem Einschalten ergibt sich:

$$T_J(t) = T_0 + P_{th} \cdot \sum_{i=1}^n R_{th,i} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad (2.29)$$

mit T_0 der Temperatur zum Einschaltzeitpunkt.

2.4.2 NUMERISCHE METHODEN

Eine genaue Aussage über die thermischen Vorgänge im betrachteten System ist nur durch Lösen der Navier-Stokes-Gleichungen möglich, welche die stattfindenden physikalischen Vorgänge mittels nichtlinearer partieller Differentialgleichungen beschreiben. Diese Gleichungen lassen sich in der Regel nur mit Hilfe numerischer Verfahren lösen, die auf Ansätzen aus der Kontinuumsmechanik beruhen. In einem infinitesimal kleinen Kontrollvolumen werden die makroskopischen Eigenschaften

eines Fluides, wie beispielsweise die Dichte, als konstant angenommen. Diese Fluidteilchen werden als materielle Körper behandelt, denen physikalische Größen zugeordnet werden. Die Eigenschaften des Fluides sind jedoch i. A. eine Funktion des Orts und der Zeit und können durch die Erhaltungssätze von Masse, Impuls und Energie beschrieben werden [27].

Bei der sogenannten Diskretisierung werden die nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen in ein System endlicher Differenzen überführt. Die diskrete Darstellung basiert auf Netz- oder Gitterpunkten und den dazwischenliegenden Zellen. Die Strömungsvariablen müssen nur an den Gitterpunkten bzw. in den diskreten Zellen bestimmt werden. Die wichtigsten Diskretisierungsmethoden sind die Finite-Differenzen-Methode (FDM), die Finite-Volumen-Methode (FVM), die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Lattice-Boltzmann-Methode (LBM). Wie in Abbildung 2.7 dargestellt ist, besitzen diese Methoden unterschiedliche numerische Eigenschaften bezüglich Flexibilität und Genauigkeit.

Die Finite-Elemente-Methode findet heutzutage in den meisten kommerziellen Strömungsmechanik-Simulationsprogrammen (engl. „Computational Fluid Dynamics“) ihre Anwendung, da sie ein hohes Maß an Flexibilität und Stabilität ohne bedeutsamen Verlust an Genauigkeit aufweist [28]. Dabei wird das komplexe Systemmodell in kleine Elemente zerlegt, die dann mit Hilfe von linearen oder höheren Ansatzfunktionen beschrieben werden. Die Art des Ansatzes wird dabei im Wesentlichen durch zwei Faktoren bestimmt, einerseits durch die Form des Elementes und andererseits durch die physikalische Fragestellung. Die gewählten Ansatzfunktionen müssen gewisse Stetigkeitsforderungen erfüllen, die

sich aus dem physikalischen Problem ergeben. Die Forderung der Erfüllung der Stetigkeitsbedingungen an den Knoten führt zu linearen Gleichungssystemen. Eine ausführliche Beschreibung der mathematischen Grundlagen zu FEM sind in [29] zu finden.

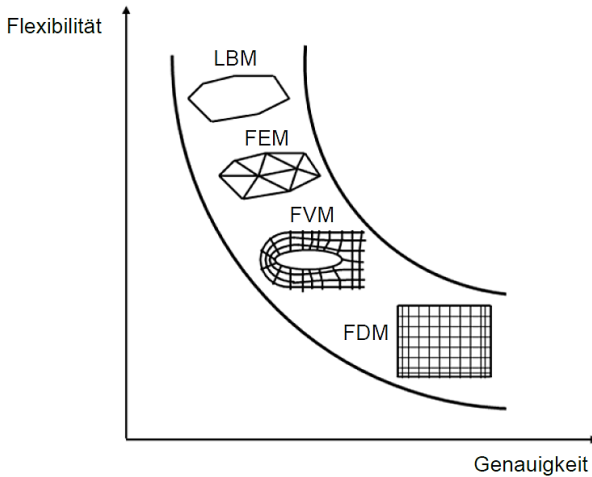


Abbildung 2.7: Übersicht und Einordnung der Diskretisierungsmethoden bezüglich Flexibilität und Genauigkeit [28]

Das FEM-Verfahren ist gut einsetzbar für 2-dimensionale Probleme, da zuverlässige Verfahren zur automatischen Netzgenerierung zur Verfügung stehen. Im 3-dimensionalen Fall erfolgt die Netzgenerierung meistens mit Hilfe von graphischen Preprozessoren. Die Anzahl der dabei entstehenden Elemente ist grundsätzlich beliebig, allerdings ist zu beachten, dass der Rechenaufwand mit zunehmend feiner werdender Elementierung überproportional steigt. Dazu sind neben dem physikalischen

Verständnis der Problemstellung, Erfahrungen im Umgang mit FEM-Programmen notwendig, da ungünstig gewählte FEM-Netze zu numerischen Fehlern führen können.

Kapitel 3

INTERDISZIPLINÄRER ENTWICKLUNGS- PROZESS DER LED-SYSTEME

Um den Entwicklungsprozess zuverlässiger LED-Systeme unter den Rahmenbedingungen Zeit, Kosten und Qualität beherrschen zu können, ist eine interdisziplinäre Vorgehensweise erforderlich. Für den Ablauf des interdisziplinären Entwicklungsprozesses in der Allgemeinbeleuchtung gibt es in der Literatur keine feste Vorgehensweise. Im Laufe der Jahre wurden lediglich verschiedene Vorgehensmodelle zur Entwicklung von Beleuchtungssystemen für jede einzelne an der Entwicklung beteiligte Disziplin² erarbeitet. Diese Vorgehensmodelle sind genau auf die Anforderungen und Eigenschaften der jeweiligen Disziplin abgestimmt. Das führt dazu, dass der Entwicklungsprozess von einer einzelnen Disziplin dominiert. Die Entwickler dieser Disziplin legt das maßgebliche Vorgehen fest, ohne dabei die Belange der anderen Disziplinen zu berücksichtigen. Erst in späteren Phasen werden die anderen Disziplinen in den Entwicklungsprozess integriert. Dieses disziplinspezifische Vorgehen bringt jedoch große Risiken und verursacht steigende Kosten und längere Entwicklungszeiten.

² Disziplin und Domäne werden in dieser Arbeit als Synonym betrachtet.

In diesem Kapitel werden im ersten Abschnitt die grundlegenden Anforderungen an den Ablaufprozess interdisziplinärer Entwicklung von LED-Systemen in der Allgemeinbeleuchtung definiert. Darauf folgend findet eine detaillierte Auswertung der etablierten Vorgehensweisen komplexer technischer Systeme. Bestimmte Vorgehensmodelle lassen sich auf die Entwicklung der LED-Systeme in Allgemeinbeleuchtung übertragen. Im Anschluss wird ein mögliches Vorgehensmodell zur Beherrschung der Komplexität und Erhöhung der Transparenz innerhalb der Entwicklung von LED-Systemen skizziert. Dieses bildet den methodischen Rahmen in den sich diese Arbeit einbettet.

3.1 ANFORDERUNGSANALYSE

Es lassen sich folgende Anforderungen hinsichtlich der Prozesse ableiten, um eine interdisziplinäre und integrierte Produktentwicklung im Sinne des optimalen Nutzens des synergetischen Zusammenwirkens der einzelnen Fachdisziplinen zu ermöglichen:

- Der Entwicklungsprozess hochwertiger LED-Systeme in der Allgemeinbeleuchtung soll anhand eines domänenübergreifenden Vorgehensmodells strukturiert werden.
- Das frühzeitige domänenübergreifende Problem- und Zielverständnis der einzelnen Disziplinen untereinander sollen diesen Entwicklungsprozess unterstützen und verstärken.

- Die Systematik soll die Entwicklungstätigkeiten der thermischen Dimensionierung in Phasen strukturieren und die Tätigkeiten innerhalb dieser Phasen detailliert beschreiben.
- Die Systematik soll geeignete Methoden und Werkzeuge des Thermomanagements empfehlen und in den Entwicklungsprozess einordnen.
- Eine Hinwendung von einer komponenten- zu einer funktionsorientierten Denkweise über den gesamten Entwicklungsprozess der LED-Systeme soll unterstützt werden.
- Die Integrationsstruktur soll eine Änderungsdynamik innerhalb der einzelnen Fachbereiche nicht behindern.

3.2 VORGEHENSMODELLE FÜR DIE ENTWICKLUNG KOMPLEXER TECHNISCHER SYSTEME

Vorgehensmodelle für die Entwicklung technischer Systeme erlauben eine einfachere Strukturierung des Entwicklungsprozesses, bieten aber darüber hinaus die Chance, Informationen zu kanalisieren. Dies sind wesentliche Voraussetzungen für einen durchgängigen und planbaren Entwicklungsprozess.

In der Mechatronik ist der Einsatz von komplexen technischen Systemen besonders ausgeprägt. Die Mechatronik basiert auf der Synergie der klassischen Ingenieurwissenschaften Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik [30]. Mechatronische Systeme besitzen eine hohe Komplexität, welche durch die große Anzahl von gekoppelten Elementen, die Vernetzung der unterschiedlichen Domänen und die erhöhte Funktionalität entsteht. Neben der Komplexität ist die Entwicklung von mechatronischen Systemen durch verringerte Produkt- und Entwicklungskosten bestimmt.

Um die einzelnen Abschnitte bei der Entwicklung technischer, insbesondere mechatronischer Systeme formal beschreiben zu können, wurden im Laufe der Zeit verschiedene Vorgehensschemata entworfen. Einige idealisierte Vorstellungen wie etwa das Wasserfallmodell [31, 32] erwiesen sich in der Praxis jedoch als nicht anwendbar [33].

Den entscheidenden Durchbruch brachte die Überlegung, dass auch zwischen weit auseinanderliegenden Entwicklungsschritten Beziehungen existieren. Diese Beziehungen ergeben sich aus dem Top-Down-Prinzip vieler Entwicklungskonzepte, besonders in der Informatik, aber auch in der Konstruktionssystematik [5]. Beim Top-Down-Prinzip wird ein komplexes Gesamtproblem durch die schrittweise Zerlegung in immer konkretere Teilprobleme aufgeteilt, die dann nach einzelner Implementierung wieder zu einer Gesamtlösung zusammengesetzt werden.

Das V-Modell ist ein Ansatz zur Formalisierung dieses Prinzips unter Berücksichtigung der Erfahrungen, die sich aus dem Wasserfallmodell ergeben haben. Wie in Abbildung 3.1 dargestellt wird, erfolgt auf der rechten Seite des V-Modells eine Zerlegung des Gesamtproblems in Teilprobleme, was einer Top-Down-Entwicklung entspricht.

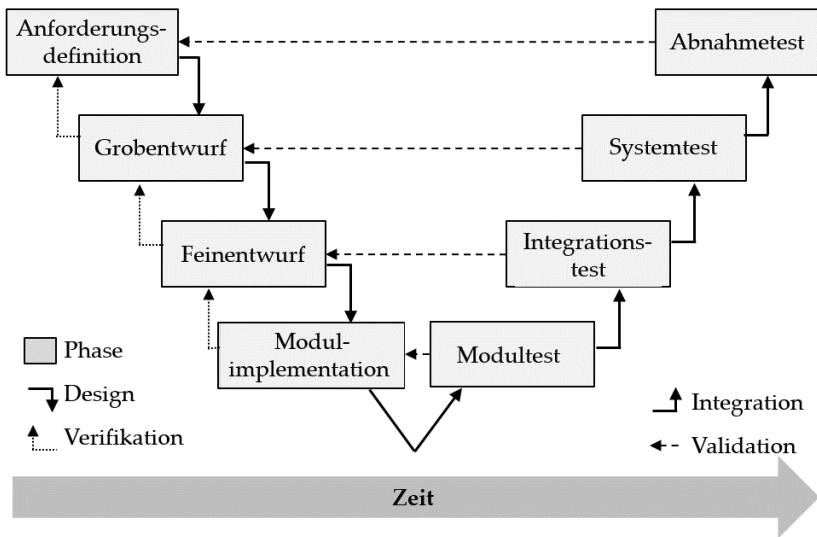


Abbildung 3.1: Das V-Modell der Informatik

Ausgehend von einem globalen abstrakten Modell, verfeinert man dieses immer weiter, um letzten Endes zu einer Ausarbeitung der Teilaufgaben zu gelangen. Sind diese Teilaufgaben abgearbeitet, erfolgt eine Integration der in den Teilaufgaben entwickelten Teillösungen. Der Grad der Integration (des Systems) der linken Seite korrespondiert dabei mit dem der rechten Seite. Diese Korrespondenz erlaubt in beide Richtungen Rückschlüsse auf Verbesserungsmöglichkeiten bzw. dient der Verifikation. Ein notwendiger Iterationsschritt, der zu einem überarbeiteten Ergebnis führt, erfolgt dabei durch horizontale Bewegung von rechts nach links im V-Modell. Folgt man den Schritten bis zum Ausgangspunkt, ergibt sich ein Zyklus innerhalb des V-Modells.

Für die Abbildung komplexer Entwicklungsvorgänge in der Informationsverarbeitung ist das V-Modell gut geeignet. Jedoch beschreibt es nur unzureichend die Reifung eines Produktes, bei dem der beschriebene Entwicklungspfad grundsätzlich mehrfach durchlaufen wird. Beim V-Modell der Informatik wird vielmehr davon ausgegangen, dass ein Rückschritt eine Reaktion auf eine Unzulänglichkeit ist und nicht ein regulärer Schritt der Entwicklung. Dadurch sind teilweise Entwicklungsvorgänge, wie sie in der Praxis vorkommen, nicht oder nur sehr schwer abzubilden. Insbesondere der Entwurf von technischen Systemen kann nicht als linearer Prozess angesehen werden. Somit sind viele technische Lösungen nur iterativ zu entwickeln [34].

Die VDI-Richtlinie 2206 übernimmt das aus der Informatik bekannte V-Modell und passt sie an die Anforderungen der Mechatronik an [30]. Entscheidend ist hier die Unterscheidung in sogenannte Mikro- und Makrozyklen. Ein Mikrozyklus beschreibt die iterative Entwicklung eines technischen Aspekts bzw. das zyklische Durchlaufen einzelner Entwicklungsschritte innerhalb des V-Modells. Ein Makrozyklus wird durch das vollständige Durchlaufen eines Vs gebildet – von der Produktidee bis zum fertigen Produkt. Anders ausgedrückt, beschreibt das V-Modell nach [30] den Ablauf einer systematischen Entwicklung in mehreren Makrozyklen.

3.3 ANWENDUNG AUF LED-SYSTEME

Bei der VDI-Richtlinie 2206 wird großer Wert auf den lösungsneutralen Systementwurf gelegt. Dabei werden die domänenspezifischen Entwick-

lungsvorgehensweisen im Makrozyklus nicht näher betrachtet. Dies begründet die Wahl der VDI-Richtlinie 2206 für den weiteren Verlauf dieser Arbeit.

3.3.1 DAS V-MODELL ALS MAKROZYKLUS

Abbildung 3.2 zeigt einen Vorschlag für den Ablauf disziplinübergreifender Entwicklung von LED-Systemen in der Allgemeinbeleuchtung als ein phasenorientiertes Vorgehensmodell und ist mit dem V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 vergleichbar. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass nach domänenübergreifendem Systementwurf eine explizite Phase der fachdisziplinspezifischen Entwicklung folgt, wobei die scheinbar entfallene fachdisziplinspezifische Entwurfsphase als integraler Bestandteil dieser Phase verstanden wird.

Das vorgeschlagene V-Modell ist organisationsneutral gehalten und beschränkt sich ausschließlich auf den technischen Entwicklungsgang. Das Vorgehen ist dabei nicht als stringente Folge zu verstehen, sondern enthält in der Anwendung zahlreiche Iterationen in Folge des Entwurfsobjekts, den organisatorischen Randbedingungen und des individuellen Problemlösungsvorgehens des Entwicklers. Das zusammengesetzte System repräsentiert je nach Reifegrad ein Funktions-/Labormuster, einen Prototyp, ein Vorserienprodukt oder ein Serienprodukt.

Das V-Modell umfasst die Phasen *Anforderungen*, *Systementwurf*, *Domänenspezifischer Entwicklung* und *Systemintegration* mit gleichzeitiger *Eigenschaftsabsicherung*. Prozessbegleitend fungiert die *Modellbildung und -analyse*.

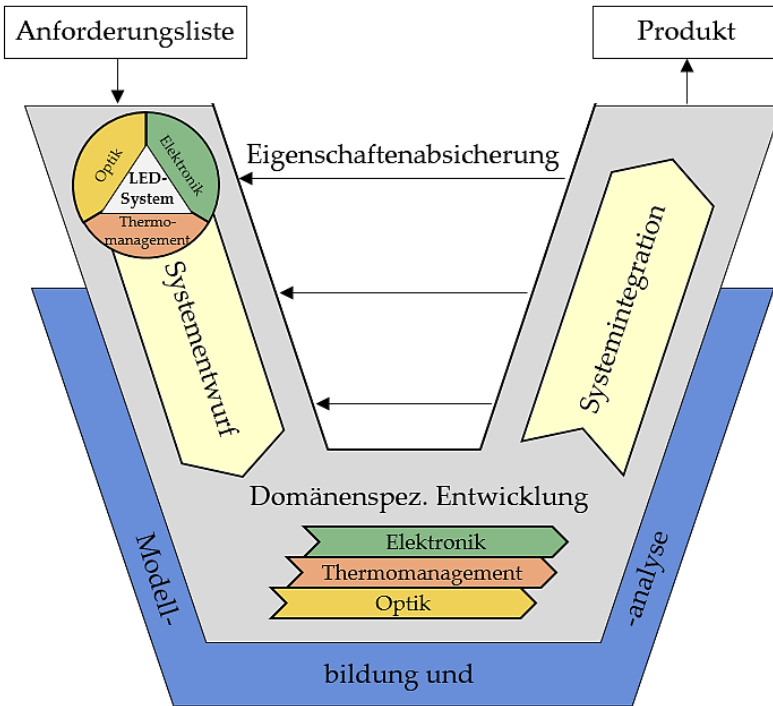


Abbildung 3.2: Prozessablauf der disziplinübergreifenden Entwicklung von LED-Systemen in der Allgemeinbeleuchtung

Die Entwicklung der LED-Systeme beginnt mit der Produktidee, die aus einem bestehenden Sachverhalt resultiert oder sich aus einer Spezifikation ergibt. Dieser wird im günstigsten Fall mit einem Entwicklungsauftrag fortgesetzt. Die anschließende Anforderungsanalyse liefert eine *Anforderungsliste*. Diese können u. a. funktionale Anforderungen, Anforderungen an die Kosten oder Anforderungen an die Gestaltung

beinhalten Die Anforderungsliste bildet die Grundlage für den Systementwurf und die Überwachung der Entwicklungsziele. Die Forderungen und Wünsche der Anforderungsliste werden auf wesentliche Aussagen und lösungsneutrale Formulierungen reduziert.

Im *Systementwurf* wird die domänenübergreifenden Prinzipiellösung der LED-Systeme festgelegt. Die dazugehörigen Tätigkeiten können Systems weitgehend aus dem Ansatz von [5] übernommen werden. Grundsätzlich beginnt der Systementwurf mit dem Abstrahieren der in der Anforderungsliste beschriebenen Vorstellungen, wobei nur die reine Funktionsweise des LED-Systems von Interesse ist. Basierend darauf werden die physikalische und logische Wirkungsweise und Anordnung der benötigten Systembestandteile festgelegt. Diese müssen hierfür noch nicht detailliert ausgestaltet sein. Dadurch wird das Vorfixieren vermieden, um den möglichen Lösungsraum nicht unnötig einzuschränken. Um die Komplexität des LED-Gesamtsystems zu beherrschen, erfolgt zu diesem Zeitpunkt eine erste Aufteilung in Module. Die Modularisierung kann nach funktionalen oder technischen Aspekten erfolgen. Dabei wird das Ziel einer entwicklungsorientierten Produktstruktur verfolgt, die die in der Modularisierung übliche funktionsorientierte und gestaltorientierte Sicht vereint. Zu diesem Zweck müssen im Systementwurf nicht nur die Eigenschaften und Beziehungen der möglichen Bestandteile des LED-Systems, sondern auch das resultierende Systemverhalten festgelegt werden. Auf diese Weise können für die identifizierten Module selbst Prinzipiellösungen konzipiert werden, die bei Bedarf auswechselbar sind.

Auf Grundlage der domänenübergreifenden Prinzipiellösung des LED-Systems erfolgt in den beteiligten Domänen die weitere System-Konkretisierung. Die bis dahin weitestgehend sequentielle Entwicklung wird

entsprechend der spezifizierten Module in parallele Stränge der *domänen-spezifischen Entwicklung* aufgeteilt. Dadurch wird sichergestellt, dass auch alle Möglichkeiten der leistungsfähigen und kostengünstigen Entwicklung eines LED-Produktes ausgeschöpft werden. Obwohl sich die im Laufe der Zeit durchgesetzten domänenspezifischen Methoden und Werkzeuge stark unterscheiden, kann man den Ablauf der domänenspezifischen Entwicklungsprozesse weitgehend einheitlich beschreiben. Um anschließend einen übergeordneten Entwicklungsstrang abzusichern, sind eine gezielte kontinuierliche Synchronisation der Entwicklungsergebnisse und die Gesamtintegration erforderlich. Hierbei empfiehlt sich eine sowohl modulinterne als auch modulübergreifende Abstimmung der beteiligten Domänen. Schließlich werden die vollständigen Entwicklungsunterlagen erstellt. Trotz umfangreicher Simulationsmöglichkeiten ist es hilfreich bereits innerhalb der Phase der domänenspezifischen Entwicklung anhand erster Funktionsmuster die Lösungsansätze des betrachteten LED-Systems zu verifizieren.

Die *Systemintegration* hat die Aufgabe, die in den einzelnen Disziplinen entstandenen Teilergebnisse zu einem übergeordneten Ganzen (dem zukünftigen Produkt) zusammenzuführen. Die dabei entstehenden LED-Gesamtsystem werden anschließend auf mögliche Inkompatibilitäten untersucht.

Die Systemintegration wird dabei durch die *Eigenschaftsabsicherung* begleitet. Die erarbeitete Lösung der Integration ist abschließend noch nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien zu analysieren. Mit Hilfe dieser Bewertungen können die unterschiedlichen Varianten verglichen, nicht umsetzbare ausgeschlossen und eine optimale ausgewählt werden.

Die oben beschriebenen Phasen werden durch die *Abbildung und Analyse* der Systemeigenschaften mit Hilfe von Modellen und rechnerunterstützten Werkzeugen zur Simulation unterstützt. Weitere Informationen dazu enthält Abschnitt 3.3.3.

Das Ergebnis der skizzierten Phasen ist ein *Produkt*. Dieses muss allerdings nach Durchlauf eines Zyklus nicht zwingend einen fertigen Zustand erreichen. Das Ergebnis kann vielmehr einen bestimmten Reifegrad auf dem Weg zum Endergebnis darstellen.

3.3.2 DAS V-MODELL ALS MIKROZYKLUS

Ausgehend aus der domänenübergreifenden Prinziplösung beschreibt der Mikrozyklus eine strukturierte und systematische Vorgehensweise für den domänenspezifischen Entwicklungsprozess. Hier empfiehlt sich, wieder die Methodik des generischen V-Modells anzuwenden, um die Einhaltung der an das Modul gestellten Anforderungen und Spezifikationen frühzeitig sicherzustellen. Aus einer Analyse des Entwicklungsprozesses auf Prozessebene folgt, dass es in drei wesentliche Prozessschritte unterteilt werden kann. Diese sind *Design*, *Fertigung* und *Validierung*. Diese Einteilung sowie die Reihenfolge des Ablaufs und bestehende Wechselwirkungen werden in Abbildung 3.3 dargestellt.

Auf Grundlage der festgelegten domänenübergreifenden Prinziplösung werden zu Beginn des *Designprozesses* der domänenspezifischen Entwicklung Zielsetzung und Rahmenbedingungen des zu betrachtenden domänenspezifischen Moduls möglichst umfassend und präzise festzulegen.

Das grenzt die Methoden und Parameter aller folgenden Schritte entscheidend ein. Basierend darauf wird das domänenspezifische Modul des LED-Systems schrittweise ausgestaltet, modelliert, simuliert, sowie analysiert. Hierbei sind CAD-Systeme und rechnergestützte Berechnungsprogramme unverzichtbare Werkzeuge. Schließlich werden die vollständigen Entwicklungsunterlagen in Form der CAD-Daten erstellt.

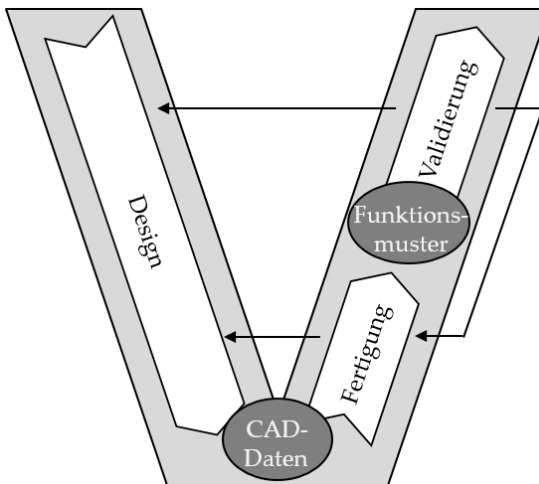


Abbildung 3.3: Prozessablauf der disziplinspezifischen Entwicklung von LED-Systemen in der Allgemeinbeleuchtung (in Anlehnung an [35])

Anschließend folgen die konstruktive Umsetzung und *die Fertigung* in Form des Prototypbaus. Hierbei werden die bei der Planung definierten Eigenschaften der Bauteile zu Rahmenbedingungen während der Kosten- und Fertigungsanalyse. Basierend darauf wird im Rahmen des Prototypbaus ein Funktionsmuster erstellt. Sollte das Funktionsmuster mit

den hier vorliegenden Unterlagen technisch nicht herstellbar sein, ist eine Überarbeitung des Designs nötig.

Nach erfolgreicher Herstellung des Funktionsmusters des domänenspezifischen Teilsystems folgt der dritte Unterprozess, *die Validierung*, der im Wesentlichen die Überprüfung der Funktionen der Bauteile und des kompletten Teilsystems beinhaltet. Der domänenspezifische Entwicklungsprozess ist erst dann abgeschlossen, wenn eine ausreichende Übereinstimmung der bei der Validierung ermittelten Kenngrößen mit der Zielstellung erreicht wurde. Andernfalls muss wie in Abbildung 3.3 dargestellt, eine Entscheidung über die weitere Vorgehensweise getroffen werden.

3.3.3 MODELLBILDUNG UND MODELLANALYSE

Wie bereits erwähnt, ist die Modellbildung ein wichtiges Hilfsmittel für die Entwicklung komplexer technischer Systeme, um beispielsweise das Systemverhalten abzubilden oder die Feindimensionierung durchzuführen. Im Allgemeinen lassen sich Modelle in reale und virtuelle Modelle unterteilen. Da die Bereitstellung von realen Modellen zeit- und kostenintensiv ist, bestehen Bestrebungen, die Anzahl dieser realen Modelle während der Entwicklung auf ein Minimum zu beschränken.

Der Einsatz von virtuellen Modellen kann dies durch die Analyse im Rechner wirkungsvoll unterstützen. Grundlage bildet hier die mathematische Abbildung physikalischer Vorgänge. Dadurch ist es dem Entwickler möglich, schon weit vor dem ersten Prototyp das Verhalten des späteren realen Systems abzuschätzen und Optimierungen durchzuführen.

Bei der disziplinübergreifenden Entwicklung von LED-Systemen in der Allgemeinbeleuchtung werden sowohl der Systementwurf, die domänen-spezifische Entwicklung als auch die Systemintegration von der Modellbildung und -analyse begleitet, wie Abbildung 3.2 dargestellt. Auch bei der Eigenschaftsabsicherung spielen Modelle im Rahmen von zunehmend virtuellen Versuchen eine große Rolle. Die Modelle, die hierbei entwickelt werden, bauen laut der VDI-Richtlinie 2206 idealerweise aufeinander auf. In diesem Zusammenhang wird von Durchgängigkeit des Entwicklungsprozesses gesprochen, die über alle Entwicklungsphasen angestrebt werden sollte.

VORGEHEN

Der prinzipielle Ablauf der Modellbildung und -analyse besteht im Wesentlichen aus folgenden Schritten:

Zielanalyse: Den Ausgangspunkt stellt die Festlegung von Untersuchungszielen und -aufgaben, die eng mit den Anforderungen des zugrundeliegenden Systementwurfs verknüpft sind. Dabei sind oft Vereinfachungen notwendig, um eine komplexe Komponente rechenzeit- und speichereffizient beschreiben zu können. Die Antworten, die man aus den Berechnungen erwarten darf, sind also eher Hinweise auf eine Richtung und geben ein qualitatives Systemverhalten wieder.

Modellbildung: Hier wird das zu betrachtende System in einem Modell abgebildet. Die dafür notwendige Modellbeschreibung erfolgt in einem mehrstufigen Prozess und kann je nach Anforderung und Betrachtungsweise in verschiedene Modellierungsarten eingeteilt werden. Weitere Details dazu enthält folgender Unterschnitt.

Analyse: Auf Basis des Modells werden, je nach betrachtete Abstraktionsebene, die Eigenschaften und das zu untersuchenden Systemverhalten analysiert. Darüber hinaus wird die Funktion des Systems analysiert und der Verbesserungsbedarf ermittelt.

Synthese: Sie dient zur Übertragung der Erkenntnisse und Ergebnisse der Modellanalyse auf das zu entwickelnde System. Lösungselemente werden ergänzt und mit vorhandenen Wirkprinzipien verfeinert und optimiert. Muss die Modellstruktur geändert oder ergänzt werden, ist eine Rückkehr zur Modellierung erforderlich, um das Modell entsprechend anzupassen.

ABSTRAKTIONSEBENEN

Zur Beherrschung der während der Entwicklung der LED-Systeme entstehenden Komplexität bietet sich das Vorgehen nach einem vierstufigen Modellabstraktionsprozess an [34, 36]. Die Ebenen bilden dabei verschiedene Abstraktionsstufe, auf denen das System als Modell repräsentiert wird. Jede Ebene leitet sich aus der nächst höheren ab, abstrahiert diese zum Teil und ergänzt neue Eigenschaften, die auf der höheren Ebene nicht darstellbar waren.

Das topologische Modell dient der Veranschaulichung der domänenübergreifenden Prinzipiellösung und somit der Modellierung der Systemtopologie, also der Anordnung und Verknüpfung von Funktionselementen (Optik, Schaltungsträger, Kühlkörper etc.). Dabei repräsentiert ein Element des LED-Systems im Allgemeinen ein der drei Basisfunktionen: elektrische, optische oder thermische Funktion. Zu den Elementen der optischen Funktion gehören die strahlformenden Komponente, die sich zum einem aus der räumlichen Ausdehnung und dem Abstrahlverhalten der

Lichtquellen und zum anderen aus der die Beleuchtungsaufgabe ergeben. Die Elemente der thermischen Funktion basieren auf funktionaler Auslegung des Thermomanagements. Elemente der elektrischen Funktion (Batterie, Schalter, Kondensator, Vorwiderstand, ...) sind die Bestandteile einer elektrischen Schaltung. Einzelnen Basisfunktionen können anschließend in Form einer Funktionshierarchie in der Phase des Systementwurfs modelliert werden. Eine Funktionshierarchie stellt somit die Zerlegung einer komplexen Gesamtfunktion in weniger komplexe, handhabbare Basisfunktionen dar.

Das physikalische Modell wird zum Teil aus dem topologischen Modell abgeleitet und beschreibt den komplexen Zusammenhang zwischen Komponenten einer Basisfunktion. Damit werden die Systemelemente ermittelt, die in der Lage sind, die spezifischen Basisfunktionen zu realisieren. So entstehen domänenspezifische Module der optischen, thermischen und elektrischen Basisfunktion, die dann separat voneinander in parallele Stränge der domänenspezifischen Entwicklung konkretisiert werden.

Das mathematische Modell beschreibt das Verhalten zwischen einem bestimmten Verlauf der Eingangs- und Ausgangsgröße in Form mathematischer Gleichungen, die auf physikalische Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen sind. Das Modell wird dabei durch eine endliche Anzahl von explizit vorliegenden Modellparametern charakterisiert.

Das numerische Modell stellt zugleich ein im Rechner simulierbares Modell dar. Mit Hilfe von Simulationen werden verschiedene Szenarien durchgespielt, um daraus Erkenntnisse über das Systemverhalten bezüglich der jeweiligen Fragestellung abzuleiten und so zu versuchen, eine besonders gute Lösung zu finden. Für die Berechnung der Zustände des im Rechner simulierbaren Modells werden mehr oder weniger Rechenressourcen

benötigt. Da der Rechenaufwand mit der Detailgenauigkeit überproportional ansteigt, soll das Modell so einfach wie möglich sein und dennoch erlauben, die Bauteile der physikalischen Baugruppe auf ihre physikalischen Eigenschaften zu untersuchen.

Erst nach dem Ablauf dieser vier Ebenen wird das Gesamtmodell verifiziert. Die Modellbildung ist abgeschlossen, wenn eine ausreichende Übereinstimmung der hierbei ermittelten Kenngrößen mit der Zielstellung erreicht wurde. Andernfalls sind Sprünge zurück in vorhergehende Entwicklungsschritte notwendig. Mit welcher Effizienz Mängel identifiziert und behoben werden, hängt dabei wesentlich von der Modellierungstiefe und somit dem Detailierungsgrad ab, da eine Änderung auf einer Ebene zwangsläufig Auswirkungen auf die darunterliegenden Ebenen hat.

Durch derartige Darstellung in vier Modellebenen lässt sich das Optimierungspotential während der Modellbildung erkennen. Eine Verbesserung des Systems ist demnach auf allen Ebenen denkbar. Je höher die Ebene, umso größer sind jedoch der Änderungsaufwand und der Validierungsaufwand zur Sicherstellung der kritischen Funktion.

Kapitel 4

ENTWICKLUNGSSYSTEMATIK ZUM THERMOMANAGEMENT DER LED-SYS- TEME IN DER ALLGEMEINBELEUCH- TUNG

Dieses Kapitel bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Hier wird eine Systematik zur thermischen Dimensionierung der LED-Systeme in Allgemeinbeleuchtung vorgestellt. Der grundlegende Ablauf basiert zum einen auf den verfügbaren Informationen aus der Literatur [9, 17, 20] und wurde zum anderen aus der Prozessanalyse mit dem Schwerpunkt auf der thermischen Dimensionierung der LED-Systeme in der Allgemeinbeleuchtung erarbeitet. Der hier präsentierte Entwicklungsprozess des Thermomanagements der LED-Systeme ist in das im Abschnitt 3.3.2 vorgestellte V-Modell als Mikrozyklus integriert. Ausgehend von einem abstrakten topologischen Modell, verfeinert man dieses immer weiter, um letzten Endes zu einer Ausarbeitung der Teilaufgaben zu gelangen. Mit jeder Stufe steigt der Grad der Spezifikation. Sind diese Teilaufgaben abgearbeitet, erfolgt eine Integration der in den Teilaufgaben entwickelten Teillösungen. Der Grad der Integration korrespondiert dabei mit dem Grad der Spezifikation. Diese Korrespondenz erlaubt in beide Richtungen Rückschlüsse auf Verbesserungsmöglichkeiten und dient somit

der Verifikation des Modells. Im Vorgehensmodell zur thermischen Dimensionierung der LED-Systeme in Allgemeinbeleuchtung sind neben den einzelnen Phasen auch die zu beachtenden Wechselwirkungen in Form von Restriktionen an entsprechenden Stellen aufgeführt wurden. Durch eine überschaubare Zahl von Restriktionen soll eine hohe Änderungsdynamik erreicht werden.

Im Folgenden werden die Prozessschritte und die zu erarbeitenden Resultate der einzelnen Phasen erläutert. Zu beachtende Wechselwirkungen in Form von Restriktionen werden an entsprechender Stelle aufgeführt. Zu den einzelnen Prozessschritten werden außerdem Methoden der thermischen Dimensionierung empfohlen. Dabei ist die Modellbildung ein wichtiges Hilfsmittel, um Eigenschaften des späteren Produktes festzulegen und zu testen. Ausgehend vom topologischen Modell werden schrittweise physikalisch-mathematische Modelle mit Hilfe von geeigneten Entwicklungsumgebungen entworfen. Dabei wird bewusst auf Beispiele verzichtet. Die durchgängige Anwendung der erarbeiteten Entwicklungssystematik wird anhand zweier Demonstratoren in Kapitel 6 betrachtet.

4.1 PHASE 1: DESIGN

Die erste Phase umfasst alle Aspekte, die in Zusammenhang mit der Planung, der Auswahl und der Dimensionierung der wichtigsten Elemente zur Wärmeabfuhr stehen, die man aufgrund ihrer intensivierten Wärmeübertragung zur Lösung thermischer Probleme nutzt. Der wesentliche Ablauf und bestehende Wechselwirkungen innerhalb dieser Phase sind

in Abbildung 4.1 dargestellt. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen, blau markierten Schritte des Designprozesses näher erläutert.

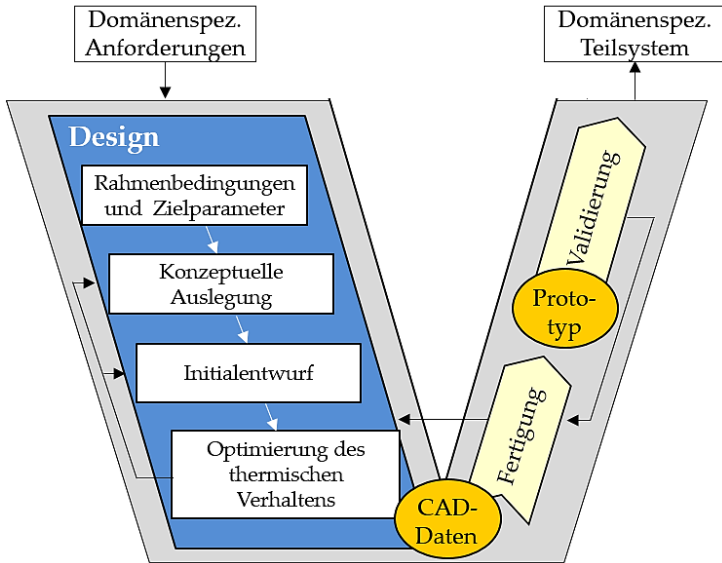


Abbildung 4.1: Prozessablauf in der Phase des Designs bei der Auslegung des Thermomanagements

Zu Beginn der funktionalen Auslegung des Thermomanagements von einem LED-System ist es nötig, die *Rahmenbedingungen und Zielparameter* möglichst umfassend und präzise festzulegen. Als nächstes findet die *konzeptionelle Auslegung* des LED-Systems statt. Hierbei wird das grundsätzliche Prinzip des Wärmetransports anhand des thermischen Pfades festgelegt. Als Nächstes findet der *Initialentwurf* statt. Hier wird durch Auswahl und Dimensionierung geeigneter Elemente zur Wärmeabfuhr die Einhaltung der thermischen Anforderungen im System sichergestellt.

Als letzter Schritt der Design-Phase erfolgt die thermische Simulation, in der die angesprochenen Rechnerwerkzeuge zur virtuellen Eigenschaftsüberprüfung eingesetzt werden, bevor in der Phase der Fertigung ein Prototyp des Systems gebaut und getestet werden kann. In der Regel zeigen die ersten Simulationsergebnisse des Initialentwurfs noch nicht das gewünschte thermische Verhalten bzgl. der Zielparameter oder bieten zumindest Raum für Verbesserung. Daher ist eine sukzessive *Entwurfsoptimierung bezüglich des thermischen Verhaltens* notwendig.

Falls die Optimierung des Entwurfs zum gewünschten Ergebnis geführt hat, indem die angestrebten Ziele des Thermomanagements erreicht wurden, ist diese Entwicklungsphase abgeschlossen. Andernfalls muss, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, eine Entscheidung über die weitere Vorgehensweise getroffen werden. Das Resultat der Design-Phase sind die vollständigen Entwicklungsunterlagen thermischer Dimensionierung von Systemkomponenten, wie zum Beispiel Schaltungsträger und Kühlkörper.

4.1.1 RANDBEDINGUNGEN UND ZIELPARAMETER

Grundsätzlich lassen sich die Randbedingungen an das Thermomanagement in zwei Gruppen eingeteilt: die äußeren Randbedingungen, die auf die Systemfunktionalität wesentlichen Einfluss haben, sowie die internen Randbedingungen, die sich durch die Wahl der Basiskomponenten ergeben.

Zu den äußeren Randbedingungen gehören beispielsweise Umgebungstemperatur, Feuchtigkeit, Strom und Spannung, mechanische Kräfte, Systemgröße, Gewicht, Chemikalien und einwirkende Strahlung. Typischerweise folgen diese Randbedingungen aus der Anforderungsliste und aus gesetzlichen Regelungen und Vorschriften.

Eine nicht vernachlässigbare Rolle bei der funktionalen Auslegung des Thermomanagements von LED-Systemen spielen die internen Randbedingungen, die sich durch die Wahl der Basiskomponenten ergeben. Dazu gehören insbesondere die Art und die Anzahl der Lichtquellen und der elektrischen Vorschaltgeräte als Wärmequelle. Des Weiteren können die einzusetzenden Materialien und Herstellungsverfahren weitere Einschränkungen auf den Lösungsraum der thermischen Problemstellung liefern. Andere Einflussfaktoren, die die Funktionalität des LED-Systems beeinträchtigen, sind der grundsätzlich verfügbare Bauraum und die Bauform, sowie der Kosten- und Zeitrahmen. Internen Randbedingungen können dabei sowohl direkt aus gesetzlichen Regelungen und Vorschriften als auch aus der erarbeiteten domänenübergreifenden Prinzipiellösung folgen.

Die angestrebten thermischen Ziele beinhalten typischerweise die maximale Temperatur an der aktiven Zone der LED und die maximale Temperatur an der Gehäuseoberfläche. Außerdem kann eine Abschätzung des für die Beleuchtungsaufgabe benötigten Lichtstroms und der erwarteten Effizienz des Systems eine weitere Zielsetzung liefern.

4.1.2 KONZEPTIONELLE AUSLEGUNG

Zu Beginn der konzeptuellen Auslegung des Thermomanagements steht die Zielanalyse. Hierbei muss neben den Untersuchungszielen und -aufgaben geklärt werden, in welcher Qualität und Art die Antwort auf die Fragestellung erwartet wird. Wie genau muss die Antwort sein? Geht es um Prinzipuntersuchungen an einem neu zu entwickelnden System, um eine konkrete Systemauslegung oder um eine Analyse und anschließende Optimierung eines bestehenden Systems?

Als Nächstes steht die Wahl des geeigneten Kühlkonzeptes. Hierbei wird festgelegt, ob zur Lösung der thermischen Aufgabe eine passive oder eine aktive Entwärmung mittels Luft eingesetzt werden muss. In vielen Anwendungsbereichen der LED-Systeme entfällt dies durch ein von den äußeren Randbedingungen definiertes Entwärmungskonzept. Aktive Entwärmungskonzepte erzeugen aufgrund der Lüfterflügelrotation für das menschliche Ohr hörbare Luftbewegungen, die nicht erwünscht sind. Sonst kann eine Abschätzung des maximal zulässigen thermischen Gesamtwiderstands des zu betrachtenden Systems eine Eingrenzung liefern. Dieser lässt sich durch Umstellen von Gleichung (2.23) bei einer festgelegten maximalen Chiptemperatur $T_{J\max}$, einer maximalen Umgebungstemperatur $T_{U\max}$ und einer bekannten abzuführenden Verlustleistung P_{th} mit Gleichung 4.1 berechnen:

$$R_{th\ JU\max} = \frac{T_{J\max} - T_{U\max}}{P_{th}} \quad (4.1)$$

Um hierbei einen Sicherheitsfaktor zu erhalten, wird die Annahme getroffen, dass die der LED zugeführte elektrische Leistung annähernd zu

100% in Verlustleistung und damit in einen abzuführenden Wärmestrom umgesetzt wird. Dieser Sicherheitsfaktor ergibt sich aus nach Gleichung (2.24) bei einer optischen Effizienz der LED $\eta=0$.

Zur analytischen Abschätzung der Größe des möglichen thermischen Gesamtwiderstandes im zu betrachtenden System wird dieser zunächst in seine aus Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung resultierenden Anteile aufgeschlüsselt. Dazu wird das topologische Modell des Gesamtsystems in ein domänenspezifisches Ersatzmodell überführt. Hier stellt die Reduktion auf ein stationäres, eindimensionales Problem eine hilfreiche Vereinfachung dar.

4.1.3 INITIALENTWURF

Auf Basis des festgelegten thermischen Pfades und des gewählten Kühlkonzeptes werden im Prozessschritt Initialentwurf die einzelnen Systemkomponenten durch Anwendung geeigneter Hilfsmittel in thermischer Hinsicht dimensioniert. Hierbei gilt, je geringer entsprechende Beträge der Einzelwiderstände im Wärmepfad sind, umso geringer ist die sich ergebende Temperaturerhöhung an der aktiven Zone der LED. Da der thermische Widerstand und die Verlustleistung der LEDs nur vom Hersteller beeinflusst bzw. reduziert werden können, liegt die Lösung in der Auslegung von Komponenten des thermischen Pfades von der Lötstelle der LED bis zur Applikationsumgebung. Hierbei haben die im Abschnitt 4.1.1 erwähnten internen Rahmenbedingungen einen großen Einfluss.

Hier werden zunächst die einzelnen Systemkomponenten durch mathematische Modelle beschrieben. Da die räumlichen mathematischen Modelle sehr umfangreich werden können und somit einen erheblichen Rechenaufwand bedeuten, bleibt die Modellierung innerhalb dieses Prozessschrittes meist auf der Komponentenebene für den 1-dimensionalen stationären Fall beschränkt. Berechnungen auf Basis der in Abschnitt 2.3.1 eingeführten Wärmeübertragungsmechanismen helfen dabei, die entsprechenden Beträge der Einzelwiderstände im Wärmepfad zu definieren.

Aus der Literatur sind für den Entwurf einzelner Komponenten zahlreiche, in Art und Berechnungsaufwand sehr unterschiedliche Auslegungstechniken bekannt. Im Folgenden wird eine Übersicht über die Entwurfstechniken für die wichtigsten Elemente zur Wärmeabfuhr gegeben, die man aufgrund ihrer intensivierten Wärmeübertragung zur Lösung thermischer Probleme nutzt. Dabei steht die Wärmeabfuhr durch freie Konvektion im Vordergrund. Diese Elemente sind der Schaltungsträger und der Kühlkörper. Neben dem richtigen Entwärmungskonzept spielt ebenfalls die optimale, auf die Applikation zugeschnittene, wärmetechnische Kontaktierung der zu kühlenden Bauteile auf der Wärmesenke eine wichtige Rolle. Anschließend wird auf die thermische Dimensionierung des Systemgehäuses und die dadurch verursachte Änderung der Wärmeabfuhr eingegangen.

ENTWURF EINES SCHALTUNGSTRÄGERS

Neben der Hauptfunktion, eine elektrische Verbindung zwischen den einzelnen Bauteilen einer elektronischen Schaltung bereitzustellen, übernimmt der Schaltungsträger zusätzlich mechanische und thermische Funktionen. Auf Basis dieser Funktionenkombination kommt ihm eine entscheidende Aufgabe zu, die entstehende Wärme von der LED zu einer Wärmesenke möglichst effektiv abzuleiten.

Grundsätzlich lassen sich Schaltungsträger in drei Kategorien einteilen: flexibel, starr-flexibel und starr [37]. Dabei bieten vor allem starre Schaltungsträger aus thermischer Sicht eine hohe Anzahl an Entwurfstechniken. Starre Schaltungsträger verbessern darüber hinaus die mechanische Stabilität der Baugruppe. Aus diesen Gründen wird im Folgenden eine Übersicht über die wichtigsten Entwurfstechniken für starre Schaltungsträger gegeben.

Je nach Anforderungen, Einsatzgebiet, Komplexität und den zulässigen Kosten der Schaltungsträger kommen verschiedene Materialien als Basis für starre Schaltungsträger zum Einsatz. Grundsätzlich wird zwischen organischen und anorganischen Schaltungsträger unterschieden. Während Kunststoffe und Leiterplatten auf Epoxidbasis die Gruppe der organischen Trägermaterialien bilden, zählen die keramischen Schaltungsträgern zur Gruppe anorganischer Trägermaterialien. Bei Letzteren kommen vor allem Aluminiumoxid und Aluminiumnitrid zur Anwendung. Sie weist beträchtliche Vorteile gegenüber dem Epoxidharz auf, wie beispielsweise eine gute Wärmeleitfähigkeit und eine höhere Temperaturbeständigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit vom Aluminiumnitrid liegt bei 110 W/mK und vom Aluminiumoxid bei 24 W/mK, während die

Wärmeleitfähigkeit von kostengünstigen Basismaterialien wie FR4³ 0,3 W/mK beträgt. Ein großer Vorteil der organischen Schaltungsträger ist jedoch, dass diese signifikant kostengünstiger sind, weshalb sich der Einsatz von keramischen Schaltungsträgern jeweils auf die Bereiche der Leistungselektronik begrenzt, die die Eigenschaften von Keramik zwingend erfordern [38, 39].

Die metallischen Schaltungsträger (kurz IMS von engl. “Insulated Metal Substrate“) gehören auch zu den anorganischen Schaltungsträgern, stellen aber eine weitere Sondergruppe dar, da diese nur die mechanischen und thermischen Aufgaben übernehmen. Die elektrische Schaltung muss dann mittels zusätzlicher Isolationslagen realisiert werden. Die typischen Schichtdicken betragen 1 mm bis 3 mm für den Metallträger aus Aluminium oder Kupfer, 75 μm bis 100 μm für die Isolationsschicht und 35 μm bis 200 μm für die Layout-Lage aus Kupfer [40]. Je höher die Wärmeleitfähigkeit der Isolationsschicht ist, desto besser ist die lineare Wärmeleitung im Schaltungsträger. Eine gute Wärmeverteilung lässt sich außerdem bei metallischen Schaltungsträgern erreichen, indem die obere Kupferschicht für den Anschluss der LED möglichst breit auslegt wird.

Heutzutage stellt die IMS-Technologie für unterschiedliche LED Anwendungsbereiche eine weit verbreitete Lösung dar, um die entstehende Wärme von der LED zu einer Wärmesenke effizient abzuführen. Die speziellen Anforderungen der LEDs geben dennoch einen Anstoß für

³ FR4 oder auch FR-4 bezeichnet eine Klasse von schwer entflammaren und flammenhemmenden Verbundwerkstoffen bestehend aus Epoxidharz und Glasfasergewebe.

weitere Entwicklungen. Dabei kann durch die vielfältigen Designmöglichkeiten von organischen Schaltungsträgern auf Epoxidbasis die Leistungsfähigkeit vorhandener Leiterplattendesigns massiv gesteigert werden [41]. Um ihre geringe Wärmeleitfähigkeit von $0,3 \text{ W/mK}$ bei adäquatem Kostenaufwand zu erhöhen, bieten sich zwei Techniken, die sich in ihren Eigenschaften und Einsatzbereichen stark unterscheiden:

- Erhöhung der linearen Wärmeleitung,
- Erhöhung der radialen Wärmespreizung.

Während die erwärmte Fläche mit der Länge des Wärmepfades bei linearer Wärmeleitung proportional wächst, besteht bei radialer Wärmespreizung ein quadratischer Zusammenhang zwischen der erwärmten Fläche und der Länge des Wärmepfades.

Bei der ersten Technik zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Schaltungsträgers wird die Wärmeabfuhr durch Integration eines Materials mit höherer Wärmeleitfähigkeit in den Schaltungsträger lokal verbessert. Eine lokal hohe Wärmeabfuhr lässt sich zum Beispiel durch den Einsatz von sogenannten Thermal-Vias erreichen. Dabei handelt es sich um gebohrte Durchkontaktierungen, die speziell für den vertikalen Wärmetransport als Kupferhülsen in die Leiterplatte platziert werden. Da ein Via alleine nicht sehr viel Wärme leiten kann, sind mehrere eng aneinander platzierte Vias zur Erhöhung der lokalen Wärmeabfuhr erforderlich. Die Leistungsfähigkeit eines Thermal-Via-Arrays ist jedoch fertigungstechnisch auf eine bestimmte Anzahl Bohrungen pro Fläche limitiert, so dass die mittlere thermische Leitfähigkeit eines typischen Thermal-Via-Arrays bei ca. 30 W/mK liegt [42].

Die Formel zur Berechnung der des thermischen Widerstandes der Via kann aus Gleichung (2.8) abgeleitet werden. Durch das Ersetzen der Fläche A in Gleichung (2.8) durch die Fläche der Via ergibt sich die Gleichung:

$$R_{th} = \frac{d}{\lambda \cdot \pi \cdot (r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.2)$$

wobei r_o und r_i äußerer und innerer Durchmesser einer Via sind. Werden 10 Vias parallelgeschaltet, reduziert sich der thermische Widerstand um den Faktor 10, analog zur Parallelschaltung von Widerständen.

Zur weiteren Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit sollen die Durchgangslöcher möglichst nahe an der Wärmesenke der LED liegen. Somit ist die optimale Auslegung eines Vias-Konzeptes aus technischer Sicht immer eine maßgeschneiderte Lösung und hängt stark von der LED und dem zu Verfügung stehenden Platz ab. Zwar stellt der Einsatz einer FR4-Platine mit thermischen Vias für die Serienproduktion eine kostengünstigere Lösung dar, dennoch ist ihr Einsatz für den Prototypbau nur aufwendig umsetzbar.

Die zweite Technik der Erhöhung der radialen Wärmespreizung wird zum Beispiel durch den Einsatz von Dickkupfer-Leiterplatten erzielt. Eine effektive radiale Wärmespreizung kann dabei sowohl durch Kupferflächen auf den Außenlagen sowie durch zusätzliche Innenlagen realisiert werden. Dabei verteilen diese Flächen die Wärme umso besser, je dicker sie sind. Die typischen Basiskupferschichten liegen zwischen 200 μm und 400 μm [43].

Des Weiteren lässt sich die radiale Wärmespreizung über die „Heatsink-Technologie“ verwirklichen. Dazu werden vorzugsweise dünne Leiterplatten mit Hilfe einer Wärmetransferkleberfolie großflächig auf Metallbleche laminiert, die dann als „Heatsink“ fungieren [43]. Die Blechstärke ist applikationsspezifisch und variiert zwischen 1 mm und 4 mm. Das Heatsink kann je nach Applikation eine andere Form einnehmen und beispielhaft mit Kühlrippen versehen sein.

Ein neuer Technologieansatz zur Entwärmung von Leiterplatten basiert auf dem Hinterspritzen von vorher strukturierten Leiterplatten auf Epoxidbasis mit wärmeleitfähig modifiziertem Kunststoff. Durch das Verwenden von Hochtemperatur-Thermoplasten mit der Hinzugabe von ausdehnungsarmen keramischen Füllstoffen werden sowohl die Wärmespreizung als auch das lokale Abführen von Wärme verbessert. Für die Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit einer partikelgefüllten Matrix gibt es eine Reihe von mathematischen Modellen. Ein Überblick darüber geben [39, 43]. Die physikalischen Eigenschaften solcher Werkstoffssysteme sind jedoch so komplex, dass die mathematischen Beschreibungen immer Einschränkungen unterworfen sind. So fehlen gerade für hohe Füllgrade genauere experimentelle Untersuchungen und mathematische Modelle für die Wärmeleitfähigkeit einer gefüllten Matrix, in der die Füllstoffpartikel und deren Richtungsabhängigkeit der Wärmeleitung untereinander in Wechselwirkung stehen.

ENTWURF EINES KÜHLKÖRPERS

Wurde die Wärme durch den Schaltungsträger effektiv geleitet, muss sie auf der Rückseite weiter an die Umgebung effektiv abgeführt werden. Dies erfolgt meist durch einen Kühlkörper, wobei die Intensivierung der

Entwärmung durch verbesserte Wärmekonvektion mittels vergrößerter Wärmeübertragungsfläche stattfindet. Der resultierende thermische Gesamtwiderstand des Kühlkörpers setzt sich folglich aus dem thermischen Widerstand der Wärmeleitung im Kühlkörper R_{thL} und dem thermischen Widerstand zwischen Kühlkörperoberfläche und Umgebung zusammen. Dabei tritt die Kühlkörperoberfläche über die Konvektion und die Strahlung mit den Umgebungsgegenständen der Temperatur T_U in Wechselwirkung. Folglich ergibt sich der thermische Widerstand zwischen Kühlkörperoberfläche und Umgebung durch die Parallelschaltung der thermischen Widerstände der Wärmekonvektion R_{thK} und der Wärmestrahlung R_{thS} .

$$R_{thGes} = R_{thL} + \left(\frac{1}{R_{thK}} + \frac{1}{R_{thS}} \right)^{-1} \quad (4.3)$$

Damit zeigt sich, dass der thermische Gesamtwiderstand des Kühlkörpers direkt aus der Veränderung einer der drei Größen bei festen anderen beiden Größen ableitbar ist. Daher soll im Folgenden nur noch auf Möglichkeiten der Variation dieser Größen eingegangen werden.

Die Wärmeleitung innerhalb des Kühlkörpers wird durch Einsatz von thermisch gut leitenden Stoffen verbessert, wie Aluminium und Kupfer oder, in speziellen Fällen, auch die Keramiken Aluminiumnitrid oder Aluminiumoxid. Bei der Materialauswahl für den Kühlkörper sind neben wärmeleitenden Eigenschaften auch das Gewicht, die Kosten sowie die Verarbeitbarkeit und die Möglichkeit der Oberflächenbehandlung zu beachten. Kupfer hat zwar eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit, ist aber im Vergleich zu Aluminium wesentlich schwerer und teurer. Außerdem lässt

sich Aluminium leicht mithilfe nahezu aller Verfahren spanend bearbeiten. Damit bietet es einen großen Vorteil und verschiedene Möglichkeiten für die Kühlkörperherstellung.

Weiter verhindert oft der Wärmeübergangswiderstand vom Festkörper in ein Fluid die Wärmeabfuhr durch den Kühlkörper an die Umgebung. Der große Wärmeübergangswiderstand hat nach Gleichung (2.22) seine Ursache in einem kleinen Wärmeübergangskoeffizienten α , der sich, etwa durch Erhöhen der Strömungsgeschwindigkeit, nur in speziellen Fällen vergrößern lässt. Hier liegt es nun näher, den Wärmeübergangswiderstand durch Vergrößern der Kontaktfläche A zu verringern und so die Wärmeabfuhr an die Umgebung zu verbessern.

Eine solche Flächenvergrößerung lässt sich durch das Anbringen von Rippen oder Stiften erreichen. Eine andere Möglichkeit zur Vergrößerung der Wärmeabgabefläche besteht im Einsatz von offenporigen Metallschäumen, die in ihrem Aufbau natürlichen Strukturen wie Knochengewebe ähneln. Zwar lassen sich die thermischen Eigenschaften von Metallschaum durch gezielte Auslegung von seinen Strukturparametern, wie Porendichte, Stegdicke und Stegform verbessern. Jedoch hebt sich dieser Vorteil durch eine praxisuntaugliche Erhöhung des Druckverlustes beim Durchströmen der Struktur im Metallschaum wieder auf [44]. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine optimale Wärmeübertragung an die Umgebung lediglich bei Anströmgeschwindigkeiten zwischen 1 m/s und 2 m/s erzielt werden kann. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass beim Wärmeübergang durch freie Konvektion die Metallschaumstruktur weniger effizient im Vergleich zu fein verrippten, luftdurchströmten Strukturen ist.

Der Wärmestrom erhöht sich nicht proportional zur Flächenvergrößerung, sondern ist abhängig vom Rippenwirkungsgrad η_R , der als Quotient zweier Wärmeströme definiert ist:

$$\eta_R = \frac{\dot{Q}_{tat}}{\dot{Q}_{max}} \quad (4.4)$$

Dabei ist \dot{Q}_{tat} der tatsächliche Wärmestrom und \dot{Q}_{max} der maximale Wärmestrom, der dann auftritt, wenn die ganze Rippe über ihre gesamte Länge gleiche Temperatur wie die Oberfläche hat (bei einer unendlich hohen Wärmeleitfähigkeit). Dabei hängt der durch die Rippenoberfläche übertragene Wärmestrom \dot{Q}_{tat} vom Temperaturverlauf in der Rippe ab. Bei der reinen Wärmeleitung stellt sich ein Temperaturgradient gemäß der Grundgleichung (2.5) ein. Erfolgt jedoch neben der Wärmeleitung entlang der Rippe gleichzeitig noch ein Wärmeübergang an seiner Oberfläche, verändert sich der Temperaturverlauf vom Fuß bis zur Spitze der Rippe wesentlich.

Zur Abschätzung des Temperaturverlaufs entlang einer Rippe mit konstantem Querschnitt, jedoch unterschiedlicher Form, wurden Näherungsbeziehungen in [45, 46] aufgestellt. Danach gilt

$$\eta_R = \frac{\tanh(m \cdot L_s)}{m \cdot L_s} \quad (4.5)$$

mit

$$L_s = L + \frac{A}{U} \quad (4.6)$$

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot A}} \quad (4.7)$$

wobei L die Rippenhöhe, A die Querschnittsfläche der Rippe, U der Umfang der Rippe und α der Wärmeübergangskoeffizient sind. Für die Auslegung des Kühlkörpers bzw. seiner Rippen ist der mittlere Rippenwirkungsgrad $\eta_{R,mittel}$ entscheidend. Werden die Rippenwirkungsgrade durch einen Zählindex ergänzt, so gilt für den mittleren Rippenwirkungsgrad:

$$\eta_{R,mittel} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \eta_{R,i} \quad (4.8)$$

wobei n die Rippenanzahl ist. Dafür müssen die einzelnen Rippenwirkungsgrade möglichst hoch sein. Das setzt eine möglichst hohe Temperatur an der Rippenbasis voraus. Bei einer höheren Rippendichte lässt sich dies zum einen durch eine effektive Wärmespreizung in der Kühlkörperbasisfläche und zum anderen durch optimale Rippenanordnung, beispielsweise zirkular um die Wärmequelle, erreichen.

Eine höhere Rippendichte führt zu einer Vergrößerung der Wärmeabgabefläche U und damit zu einem höheren Rippenwirkungsgrad η_R . Auf der anderen Seite hat eine höhere Rippendichte engere Rippenkanäle mit einem wachsenden Strömungswiderstand zur Folge. Das führt zu einem sogenannten by-pass Effekt: Die strömende Luft wird aus den Rippenkanälen verdrängt und strömt in zunehmendem Maße ungenutzt an der Verrippung vorbei. Die Ursache liegt in der Wandreibung mit der Bildung einer Strömungsgrenzschicht. Die Dicke der Grenzschicht ist von der Reynoldszahl abhängig. Mit der Rippenhöhe L , Rippentemperatur

T_w und der Temperatur des Umgebungsfluides T_U lässt sich der optimale Rippenabstand d_{opt} wie folgt bestimmen [18, 47]:

$$d_{opt} = 1,3 \cdot \left(\frac{L}{T_w - T_U} \right)^{1/4} \quad (4.9)$$

Wegen geringerer Luftgeschwindigkeit im Vergleich zur erzwungenen Konvektion spielt die Anordnung der Kühlrippen im Raum insbesondere bei der natürlichen Konvektion eine wichtigere Rolle. Bei einer vertikalen Rippenanordnung strömt dank Kamineffekt mehr Luft durch den Kühlkörper. Somit gibt der Kühlkörper am effektivsten die Wärme an die Umgebung ab. Auch wenn eine Entwärmung bestehen bleibt, arbeitet der Kühlkörper bei einer horizontalen Rippenanordnung nicht mehr so effektiv. Die entwärmte Luft kann nicht nach oben wegströmen und es wird nicht so viel kalte Luft nachströmen. Wenn die Anwendung es zulässt, müssen dem zu Folge die Rippen in der Praxis parallel zur Luftströmung ausgerichtet sein. Wenn bei Anwendungen nicht klar definiert werden kann, welche Ausrichtung der Kühlkörper im Betrieb hat, ist es sinnvoll vom Worst-Case auszugehen.

Eine untergeordnete Rolle spielt die Anordnung der Kühlrippen bei der erzwungenen Konvektion. Typischerweise wird die erzwungene Konvektion durch einen Lüftermotor induziert. Hier ist die Luftgeschwindigkeit höher als die Luftgeschwindigkeit der natürlichen Konvektion und überlagert diese. Hierbei eignen sich insbesondere Kühlkörper mit einer omnidirektionalen Rippengeometrie⁴, wie beispielsweise Stiftkühlkörper,

⁴ Von einer omnidirektionalen Rippengeometrie des Kühlkörpers spricht man, wenn die Luftanströmung dieses Kühlkörpers von allen Richtungen erfolgt und keine der Richtungen bevorzugt wird.

wobei die runde oder ovale Stift- bzw. Rippenform eine höhere Strömungsgeschwindigkeit der Luft als bei extrudierten Rippen ermöglicht.

Wie oben dargestellt, muss für optimalen Wärmeübergang von der Kühlkörperoberfläche an das umgebende Medium ein Optimum zwischen der Rippenhöhe, dem Rippenabstand und der Anströmgeschwindigkeit realisiert werden. Die vergrößerte Wärmeübergangsfläche wird hierbei aber durch einen zusätzlichen Wärmeleitwiderstand innerhalb des Kühlkörpers erkauft. Die Ursache liegt darin, dass die Wärmeleitung von der Rippenbasis bis zur Rippenspitze durch die dabei entstehenden kleineren Rippen-Querschnitte A verhindert wird. Trapezquerschnitte begünstigen dabei die Wärmeleitung zur Rippenspitze.

Ein weiterer Ansatz besteht im Einsatz von natürlich inspirierten Strukturen, die die Wärme wirkungsvoll an die Umgebung bzw. zur Rippenspitze übertragen. Sie zeichnen sich alle durch baumartig verzweigte Strukturen aus. Aufgrund ihrer Pflanzen-Architektur wird die Wärme in den gesamten zur Verfügung stehenden Bauraum geleitet und von dort großflächig an die Umgebung übertragen. In [48, 49] wurde gezeigt, wie mit Hilfe der mathematischen Beschreibung des Wärmetransports im Kühlkörper derartige baumartige Strukturen entwickelt werden können. Dazu wurden der Wärmetransport im Ast sowie der Wärmeübergang durch freie Konvektion an die Umgebung in einem nicht verzweigten Ast beschrieben, bevor ein Ast mit mehreren Verzweigungen betrachtet wird. Dabei wurde gezeigt, dass mit steigender Anzahl an Verzweigungen zunächst ein Rückgang des thermischen Widerstands zu erkennen ist, um mit weiteren Verzweigungen wieder anzusteigen. Abbildung 4.2 veranschaulicht den realisierten dreifach verzweigten Kühlkörper für das LED-System.

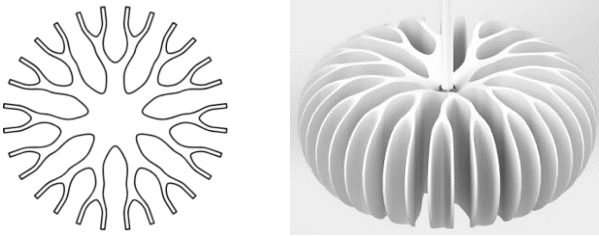


Abbildung 4.2: Pflanzenarchitektur nach dem Modell von Schoute (links) und dreifach verzweigter LED-Kühlkörper (rechts) [48]

Des Weiteren kann die Wärmeabfuhr vom Kühlkörper an die Umgebung durch die Wärmestrahlung verbessert werden. Diese ist im Gegensatz zur Konvektion nicht an ein Umgebungsmedium gebunden und ist lediglich von der Oberfläche und der Temperatur des strahlenden Körpers abhängig. Ein Rippenkühlkörper strahlt im Wesentlichen nur über seine Umrissfläche die Wärme ab [17, 20]. Da in den Rippenzwischenräumen ein sehr geringer Strahlungsaustausch stattfindet, steigt der Strahlungsanteil also nicht proportional mit der für die Konvektion zur Verfügung stehenden Fläche an. Der prozentuale Strahlungsanteil an der Wärmeabgabe ist bei einer einfachen Kühlfläche wesentlich höher als bei einem vollverrippten Kühlkörper.

Die Wärmestrahlung nimmt mit der Temperatur des strahlenden Körpers zu, wobei ein dunkler Körper mehr Wärme absorbiert und emittiert, als ein heller. Wenn zwischen der strahlenden und der aufnehmenden Fläche eine hohe Temperaturdifferenz besteht, kann ein schwarzer Kühlkörper folglich auch mehr Strahlungswärme aus seiner Umgebung

aufnehmen. Daher ist ein schwarz eloxierter Kühlkörper aus wärmetechnischer Sicht meistens sinnvoll:

- bei natürlicher Konvektion und höheren Oberflächentemperaturen und
- wenn sich keine sonstige wärmere Strahlungskörper in der Nähe befinden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Wärmewiderstand eines Kühlkörpers im Wesentlichen von folgenden Faktoren abhängig ist:

- Temperaturdifferenz Kühlkörper zu Luft
- Länge des Kühlkörpers in Strömungsrichtung
- Größe der wärmeabgebenden Oberfläche des Kühlkörpers
- Kühlkörpermateriale
- Beschaffenheit der Kühlkörperoberfläche.

ENTWURF EINES GEHÄUSES

In den meisten Anwendungsfällen wird das thermisch dimensionierte System in ein Systemgehäuse untergebracht, welches als Tragstruktur dient. Grundsätzlich lassen sich Gehäuse in offene und geschlossene Systeme unterscheiden. Bei offenen (luftdurchlässigen) Systemen tritt Luft in das Gehäuse ein, übernimmt durch Konvektion die Wärme von den Oberflächen der Baugruppen und tritt aus dem Gehäuse wieder aus. Wo

diese Art der Wärmeabfuhr wegen weiterer Geräteanforderungen, z. B. des Berührungs-, Fremdkörper- und Wasserschutzes, der elektromagnetischen Verträglichkeit sowie Designaspekten, nicht zulässig ist, verwendet man geschlossene (luftundurchlässige) Systeme. Im sehr ungünstigen Fall erfolgt die Wärmeabgabe an die Umgebung nur über die Gehäusewand durch Konvektion und Strahlung.

Beim offenen Gehäuse ist die Konvektion von der Größe und der Anordnung der Lüftungsöffnungen und der Lüftungskanäle im Gehäuse abhängig. Hierbei ist für eine effektive Luftströmung neben einer ausreichenden Luftzufuhr auf eine möglichst barrierefreie Luftabfuhr zu achten. Es soll die gleiche Menge an Luft in das Gehäuse nachströmen, wie sie das Gehäuse verlässt. Bei der Positionierung der Ein- und Austrittsöffnungen sind vertikale Strömungskanäle wegen der aufsteigenden warmen Luft anzustreben, wobei insbesondere Druckverluste durch Kanaleinengungen und Änderungen der Strömungsrichtung zu vermeiden sind. Abbildung 4.3 zeigt Beispiele für offene Gehäuse mit Ein- und Austrittsöffnungen.

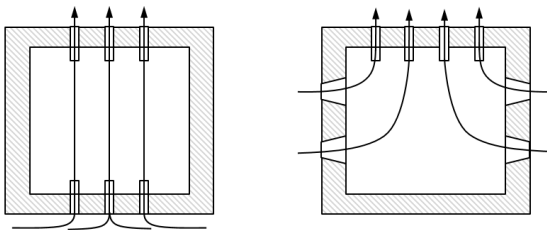


Abbildung 4.3: Beispiele für offene Gehäuse mit Ein- und Austrittsöffnungen (in Anlehnung an [20])

Da die Berechnung der Größe dieser Konvektion im offenen Gehäuse sehr zeit- und rechenintensiv ist, kann ein sog. Belüftungsfaktor K_B als Maß für die Dimensionierung der Luftschlitze im Gehäuse dienen [47]. Dieser gibt an, wie viel Prozent der Gehäuseoberfläche wirksam perforiert sind:

$$K_B = \frac{2 \cdot A_{Luft}}{A_{ges}} \cdot 100\% \quad (4.10)$$

mit A_{Luft} minimale Fläche, die für die Strömung der Luft wirksam ist, und A_{ges} gesamte Oberfläche des Gehäuses. Nach [47] soll der Belüftungsfaktor im Bereich bis 25% liegen, da ein größerer Belüftungsfaktor keine wirksame Verbesserung bringt.

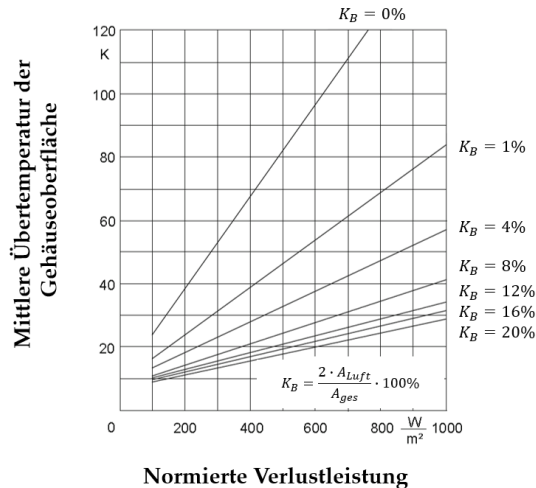


Abbildung 4.4: Mittlere Übertemperatur von blanken Gehäuseoberflächen ($\varepsilon=0,05$) mit unterschiedlichem Belüftungsfaktor abhängig von der normierten Verlustleistung des Gehäuses [20]

Unter Kenntnis des Belüftungsfaktors lässt sich bei Bedarf mit Hilfe von Abbildung 4.4 die mittlere Übertemperatur ΔT der Gehäuseoberfläche gegenüber der umgebenden Luft abschätzen.

Innerhalb eines geschlossenen Gehäuses erfolgt der Wärmeaustausch mit der Umgebung nur über die Gehäusewand. Im allgemeinen Fall nimmt die Gehäusewand die vom Kühlkörper abgegebene Wärme durch Konvektion und Strahlung auf, gibt sie durch Wärmeleitung weiter und führt sie durch Konvektion und Strahlung wieder an die Umgebung ab. Wärmeübertragung bzw. -abführung durch Wärmeleitung ist möglich, wenn die Wärmequellen wärmeleitend mit der Gehäusewand verbunden sind. Dies ergibt jedoch oft konstruktive Probleme.

Die Strömungsverhältnisse in geschlossenen Gehäusen sind wegen der unterschiedlichen Temperaturverteilung kompliziert, da Zirkulation infolge benachbarter steigender und fallender Strömungen entsteht. In senkrechten Spalten, zum Beispiel zwischen Gehäusewand und Baugruppen, können aufgrund des Temperaturgefälles Wirbelzonen entstehen, die der Berechnung kaum zugänglich sind. Ähnliche Zirkulationen treten in waagerechten Spalten auf, beispielsweise im oberen Teil des Gehäuses, wenn die Unterseite des Spaltes wärmer ist als die obere Seite.

Ist das Gehäuse in Strömungsrichtung ausreichend groß, kann vereinfachend angenommen werden, dass das Gehäuse von der Umgebungsluft vollständig umgeben ist und dass die Oberflächentemperatur dieser Flächen näherungsweise der als konstant angenommenen Temperatur der Umgebungsluft entspricht. Diese gemeinsame Temperatur wird dann als Umgebungstemperatur bezeichnet. Somit kann das System bzw. der

Kühlkörper als frei umströmend mit der Umgebungsluft betrachtet werden.

Ist der Raum zwischen dem Kühlkörper und der Gehäusewand dagegen klein, kann sich keine freie Luftströmung zwischen Wärmequelle und Wand ausbilden. In diesem Fall findet der Wärmeübergang fast ausschließlich durch Wärmeleitung über die Gehäusewand statt. Die praktisch ruhende Luft setzt dem Wärmeübergang einen hohen Widerstand entgegen. Das führt zur Temperatursteigerung der Luft, die den Kühlkörper umgibt, und folglich zur unerwünschten Reduzierung der Wärmeübertragungsleistung des Kühlkörpers. Eine wesentliche Verbesserung lässt sich erzielen, wenn man die im Innern anfallende Wärme durch Wärmeleitung an die Gehäusewand überträgt. Vorteilhafte konstruktive Lösungen bietet oft eine Integration des Gehäuses als Teil des Kühlkörpers.

Wichtig ist zudem die Positionierung des Gehäuses im Raum: Ein rundum freistehendes Gehäuse kann über seine Oberfläche mehr Verlustleistung an die Umgebung abgeben als beispielsweise das in einer Nische integrierte System.

METHODEN DER ZUSAMMENSETZUNG

Die Verbindungstechnik beschreibt die Methoden der Zusammensetzung aus einzelnen Teilen. Erst mit geeigneter Verbindungstechnik erhalten mehrteilige Systeme ihre Endform und beabsichtigte Funktionalität. Die Zuverlässigkeit einer Verbindung gegenüber Überbeanspruchung und Lockerung muss in jedem Herstellungs- und

Betriebszustand gewährleistet sein. Die Eignung einer Verbindungstechnik oder einer Kombination verschiedener Techniken entscheidet sich am konkreten Einzelfall.

In vielen Fällen ist die Anbindung zwischen ausgelegten Einzelelementen für eine effektive Wärmeübertragung im System entscheidend, da ein nicht optimaler Wärmeübergang, z. B. von der Leiterplatte zum Kühlkörper, eine unkontrollierte Erhöhung der LED-Chiptemperatur als Folge hat. Neben den dadurch verursachten Funktionseinschränkungen ist gleichfalls auch eine Bauteilzerstörung möglich.

Nach physikalischen Wirkprinzipien beschreibt die Verbindungstechnik drei mechanische Verbindungstypen. Diese können stoffschlüssig, kraftschlüssig oder formschlüssig sein.

Stoffschlüssige Verbindungen werden vor allem durch molekulare oder atomare Kraftwirkung zusammengehalten. Diese sind unter normalen Umständen nicht trennbar. Die Zerstörbarkeit kann nur durch entsprechende Lösungsmittel erfolgen. Stoffschlüssige Verbindungen entstehen z. B. durch Kleben, Lötens und Schweißen.

Kraftschlüssige Verbindungen entstehen durch die Übertragung von Kräften, wie Reibung oder auch Druck. Hierbei ist die Haftreibung die verbindende Kraft der Elemente. In den meisten Fällen sind Schraubverbindungen kraftschlüssige Verbindungen, da die Schrauben so fest angezogen werden, dass die beiden verbundenen Elemente durch die Reibung zusammenhalten.

Unter formschlüssigen Verbindungen versteht man einfache Verbindungen von Bauteilen durch Verbindungselemente, wie beispielsweise Stifte

oder Bolzen. Eine Schraubverbindung ist rein formschlüssig, wenn die Schraube keine Druckkräfte auf die zu verbindenden Teile ausübt und die Schraube auf Abscheren beansprucht ist.

Die drei wichtigsten Verbindungstypen werden in Tabelle 4.1 über ihre praktische Anwendbarkeit im LED-System aufgeführt. Beim Versuch diese Verbindungsausbildungen zu charakterisieren und zu ordnen (Tabelle 4.2), können die Lössbarkeit der Verbindung und die Zusatzbedingung als wichtigste elementare Merkmale bezeichnet werden.

Tabelle 4.1: Praktische Anwendbarkeit der drei wichtigen Fügeverfahren im LED-System

	Löten	Kleben	Schrauben
Metall-Metall	werkstoff-abhängig	ja	ja
Metall-Keramik	ja	ja	ja
Keramik-Keramik	ja, vorher metallisieren	ja	ja
Kunststoff-Kunststoff, Kunststoff-Metall, Kunststoff-Keramik	nein	werkstoff-abhängig	ja

Tabelle 4.2: Kurzcharakteristik der in Tabelle 4.1 vorgestellten Fügeverfahren

Eigenschaft	Löten	Kleben	Schrauben
Verbindungselement	Lot	Klebstoff	Schraube, evtl. Mutter
Lösbarkeit	nein	werkstoffabhängig	ja
Verbindung	durch Diffusion am Grenzschicht	durch Adhäsion ⁵ , Kohäsion ⁶ an Grenzschicht	Kraft-, Reibschluss
Zusatzbedingung	Löttemperatur, Druck	Härtetemperatur, Druck	Zwischenlage
Kombination mit anderen Verbindungstechniken	nein	ja, mit kraft-, formschlüssigen Fügeverfahren	ja, mit stoffschlüssigen Fügeverfahren

4.1.4 OPTIMIERUNG DES THERMISCHEN VERHALTENS

Bis jetzt verlief die Modellierung der einzelnen Systemkomponenten auf der Komponentenebene für den 1-dimensionalen stationären Fall. Aufgrund dessen beschränkte sich die Analyse des Gesamtsystems auf die an diesen Komponenten durchgeführten Detailuntersuchungen. Dabei

⁵ Als Adhäsion bei Klebstoffen ist die Haftkraft an den Kontaktflächen zweier unterschiedlicher oder gleicher Stoffe durch Molekularkräfte bezeichnet.

⁶ Kohäsion bei Klebstoffen bezeichnet die Kräfte, die den Zusammenhalt des Klebstoffs bewirken.

wurde mit Hilfe der beim Komponentenentwurf gewonnen Erkenntnisse und eventuell vorhandener Erfahrungswerte ein optimaler Systementwurf erstellt. Jedoch wurden die im Gesamtsystem auftretenden Wechselwirkungen, die zwischen den einzelnen Systemkomponenten bestehen und das Systemverhalten wesentlich mitbestimmen, nicht ausreichend genau erfasst.

Die bestehende Problematik kann umgangen werden, indem die erzielten Ergebnisse in ein numerisches Modell des Gesamtsystems eingesetzt werden, um es anschließend anhand der beispielsweise mittels der Finite-Elemente-Methode gewonnenen Simulationsergebnisse zu überprüfen und gegebenenfalls zu verändern (Verifikation). Dazu werden zunächst für jede Komponente des Modells Materialien und Oberflächen definiert und damit deren thermische Eigenschaften vorgegeben. Die Anfangs- bzw. Randbedingungen der Simulation entsprechen hierbei den in Abschnitt 4.1.1 an das Thermomanagement gestellten Randbedingungen. Die Qualität des Ergebnisses eines solchen Modells ist insbesondere von der Netzdichte abhängig. Deshalb ist es notwendig, das Modell so zu programmieren, dass die Netzdichte den jeweiligen Größenverhältnissen angepasst ist.

Anhand des Simulationsergebnisses werden die während des Initialentwurfs erstellten Komponentenmodelle gegenüber der Funktionalität des Gesamtsystems validiert. Ziel dabei ist es, Abweichungen der Systemfunktionalität gegenüber der Spezifikation zu erkennen und dann durch die Änderung der Komponenten in den entsprechenden Komponentenmodellen zu korrigieren. Unter besonders günstigen Umständen weist die Analyse des Gesamtsystems bereits nach der ersten Simulation das

erwünschte thermische Verhalten auf und die Entwicklungsphase des Designs ist abgeschlossen.

In der Regel ist das allerdings nicht der Fall und eine Entwurfsoptimierung ist nötig. Ein möglicher Lösungsansatz basiert auf dem heuristischen Versuch-und-Irrtum-Verfahren, wobei mit Hilfe von Erfahrungswerten und Analysen aus dem detaillierten Simulationsmodell die einzelnen Initialentwurfstechniken erneut mit manuell veränderten Parametern, wie z. B. die Dicke oder der wärmeleitende Querschnitt einzelner Systemkomponenten, verwendet werden. Da dieser Ansatz keine weiteren systematischen Berechnungs- oder Designmethoden benötigt, stellt er einen verbreiteten, einfachen Weg zur Verbesserung eines Initialentwurfs dar. Allerdings ist mittels Versuch-und-Irrtum-Verfahrens, die optimale Lösung zu finden, oft zeitaufwendig und unsicher.

Eine Alternative dazu stellt die Verwendung von Optimierungsmethoden dar, die in der Lage sind das zu betrachtende System innerhalb eines Parametersatzes auszudrücken und mit Hilfe geeigneter Vorwärtsrechnung iterativ nach den „günstigsten“ Werten der Parameter suchen. Die Güte eines Parametersatzes wird in der Regel mit Hilfe einer Gütefunktion bestimmt, welche in Abhängigkeit von den Referenzdaten und den Ergebnissen der aktuellen Vorwärtsrechnung ein Gütemaß errechnet. Ein sehr allgemeiner und vielfach verwendeter Ansatz zur Bestimmung des Gütemaßes basiert auf der Ermittlung der Summe der quadratischen Abweichung von Ergebnissen der aktuellen Vorwärtsrechnung bestimmter Bewertungsfaktoren und der dazugehörigen Zielparameter. Diese wird in [50] ausführlich beschrieben und eingesetzt. Dabei indiziert der minimale Wert für das Gütemaß die vollkommene Übereinstimmung

von Bewertungsfaktor und Zielwert. Dieser Bewertungsfaktoren können neben den angestrebten thermischen Zielen aus Abschnitt 4.1.1 auch die thermischen Widerstände der einzelnen Systemkomponenten sein.

Die konkrete Wahl eines Algorithmus zur Optimierung von thermischen Vorgängen im System ist in hohem Maße von der jeweiligen Anwendung und dem System abhängig. Grundsätzlich ist es das Ziel aller Algorithmen, bei guten Konvergenzeigenschaften und mit so wenig Rechenaufwand wie möglich von einem dem Initialsystem entsprechenden Startparametersatz ausgehend ein Minimum oder ein Maximum der Zielfunktion zu finden. Einen Überblick der verschiedenen aus der angewandten Mathematik bekannten Optimierungsalgorithmen ist in [51, 52] gegeben.

Um das betrachtete System innerhalb eines Parametersatzes auszudrücken und somit eine schnelle Variation der Modellparameter zu ermöglichen, sind bei der Optimierung Modelle, deren Parametern eine physikalische Bedeutung zugeordnet werden können, den auf mathematischen Ansätzen basierenden Modellen zweifellos im Vorteil. Aufgrund der komplizierten nichtlinearen Zusammenhängen und der Behandlung räumlich verteilter Komponenten können mit physikalischen Modellen nur die einzelnen Komponentenmodelle ausreichend genau weiter verfeinert und optimiert werden.

Dieser Nachteil kann durch den Einsatz von CAD-integrierter Parameteroptimierung aufgehoben werden. Hierbei handelt es sich um ein numerisches Verfahren, um gezielt das Verhalten eines technischen Systems durch Modifikation einzelner Parameter zu beeinflussen. Grundlage der parametrischen Optimierung sind parametrisierte Berech-

nungsmodelle. Die Parameter stehen in Simulationsmodellen in der Regel als Zahlenwerte zur Verfügung, die von den Optimierungswerkzeugen so lange variiert werden, bis ein definiertes Optimierungskriterium erzielt oder ein Abbruchkriterium erreicht wird. Hierdurch können letztendlich das optimale Design (Parameterkonfiguration) ermittelt und somit eine Strukturoptimierung von Gesamtsystem und deren Komponenten zeitsparend erreicht werden.

Das Ergebnis eines erfolgreichen Abschlusses der Entwurfsoptimierung sind die geometrischen Daten der thermischen Dimensionierung, das bei einer detaillierten Simulation die erwünschten thermischen und sonstigen Anforderungen erfüllt. Man verwendet in der Regel eines der gängigen CAD-Datenformate, um eine problemlose Übergabe für die folgenden Prozessschritte der Fertigung zu ermöglichen. In diesen Konstruktionsunterlagen sind alle Anweisungen und Einzelheiten festgelegt, um die Fertigung des Werkstücks zu ermöglichen.

4.2 PHASE 2: FERTIGUNG

Die Aufgabe der Fertigungstechnik besteht in der wirtschaftlichen Herstellung eines Werkstücks. Durch die Wahl des Fertigungsverfahrens und der Bearbeitungstechnologie wird sichergestellt, dass die während der Phase des Designs gewünschte Bauteilfunktionalität gezielt erreicht und somit die geforderte Zuverlässigkeit des Gesamtsystems gewährleistet wird. Der wesentliche Ablauf und bestehende Wechselwirkungen innerhalb der Phase der Fertigung sind in Abbildung 4.5 dargestellt.

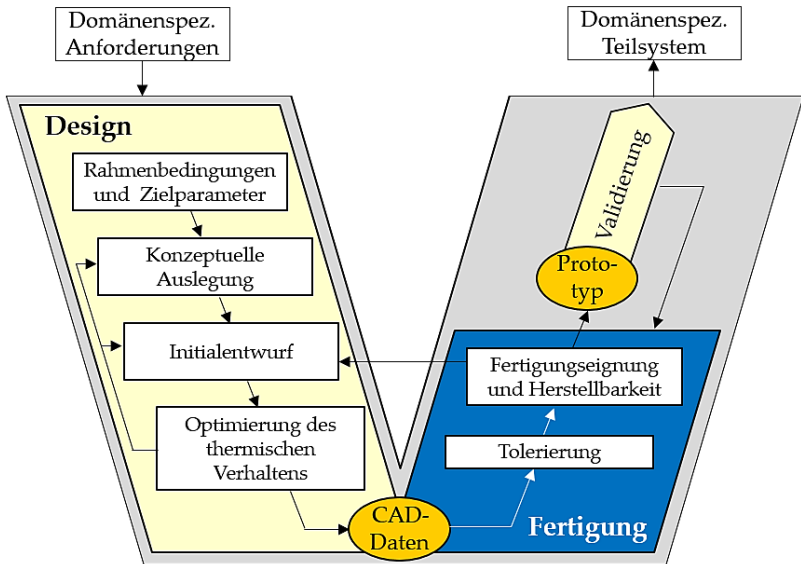


Abbildung 4.5: Prozessablauf in der Phase der Fertigung (in blau) bei der Auslegung des Thermomanagements

Zu Beginn der Ausgestaltung des Herstellungsprozesses findet die *Tolerierung* statt. Die hierbei ermittelten geometrischen Restriktionen grenzen die Wahl des geeigneten Fertigungsprozesses erheblich ein. Weitere Informationen dazu enthält Abschnitt 4.2.1.

Danach werden die Auswirkung von Toleranzen auf *Fertigungsseignung und Herstellbarkeit* von Systemkomponenten bewertet. In Abhängigkeit von den zu bearbeitenden Formelementen, dem Material, den Stoffeigenschaften, den formelementspezifischen Abmessungen, Toleranzen sowie Oberflächenmerkmalen kommen verschiedene Fertigungsverfahren zur Anwendung. Weitere Details diesbezüglich erklärt Abschnitt 4.2.2.

Werden hierbei die gewünschten Toleranzen der geometrischen Abmessungen von Systemkomponenten nicht erreicht, muss wie in Abbildung 4.5 dargestellt, eine Entscheidung über die weitere Vorgehensweise getroffen werden. Falls dagegen die gewünschte Bauteilfunktionalität erreicht und somit die geforderte Systemzuverlässigkeit gewährleistet werden können, ist die Phase der Fertigung abgeschlossen und mündet in dem Lösungskonzept für den Fertigungsprozess.

4.2.1 TOLERIERUNG

Eine technische Zeichnung bzw. ein CAD-Datensatz eines Bauteils muss, um Fertigung und Prüfung zu ermöglichen, eindeutig und vollständig sein [53]. Nach der Definition der Idealgestalt aller Bauteile muss daher für jedes funktionsrelevante Element festgelegt werden, wie weit dieses von seiner Idealgestalt abweichen darf. Diese Festlegung wird als Tolerierung bezeichnet.

Die Eigenschaften technischer Systeme streuen in der Realität. Die Ursachen dafür sind vielfältig. Beispielhaft zu nennen sind Umwelteinflüsse, Fertigungsungenauigkeiten, Prozessunsicherheiten, Alterung und Verschleiß. Das hat eine Streuung des Systemverhaltens zur Folge, die bei der Beurteilung und bei der Auslegung in Bezug auf Qualität und Kosten zu beachten ist. Hierbei stellt die Suche nach einer funktional optimalen sowie einer fertigungstechnisch durchführbaren und kostengünstigen Lösung einen häufig schwierig zu lösenden Konflikt dar [54].

Hierbei kann eine methodische Untersuchung des Einflusses von Einzeltoleranzen auf das thermische Zusammenwirken der Bauteile den Konstrukteur in diesem Konflikt unterstützen.

Eine der größten Fehlerquellen liegt hierbei oftmals in der Gestaltung des Wärmeübergangs, der wärmetechnischen Kontaktierung des elektronischen Bauteils auf die Wärmesenke. An der Grenzfläche der sich berührenden Festkörper, wie z. B. zwischen Bauelement und Kühlkörper, tritt ein thermischer Kontaktwiderstand auf. Dieser resultiert im Wesentlichen aus der unvollkommenen Verbindung beider Körper, da aufgrund von Oberflächenrauheit und anderen Faktoren, wie z. B. Lufteinschluss, keine 100 %-ige Verbindung zwischen beiden existiert. Dies führt zu einem Temperatursprung an der Grenzfläche, der proportional zum Wärmestrom über die Grenzfläche ist [20]. Weitere Details dazu enthält Kapitel 5.

4.2.2 FERTIGUNGSEIGNUNG UND HERSTELLBARKEIT

Bei der Auswahl des Herstellungsverfahrens im Zuge der Produktentwicklung sind neben den produktbezogenen Kriterien (Toleranzen) auch die verfahrensspezifischen Kriterien einzubeziehen. Für jedes Fertigungsverfahren gibt es bestimmte Grenzen für die erzielbare Genauigkeit der damit hergestellten Bauteile.

Nach [55] werden die in der industriellen Fertigung erreichbaren Genauigkeiten umformend oder urformend vorgefertigter Werkstücke zunehmend größer, und in vielen Fällen wird nur noch ein spannendes Fertigungsverfahren für die Endbearbeitung erforderlich sein. Eine weitere

zentrale Forderung in der Fertigung ist die Reduzierung der Anzahl notwendiger Fertigungsschritte. Unter Ausnutzung der größer werdenden Anwendungsbreite und Formgebungsmöglichkeiten von Fertigungsverfahren konnten durch Substitution und Integration von Fertigungsverfahren Kosten und Durchlaufzeiten innerhalb von Prozessketten insgesamt verringert und die Qualität von Produktion und Produkt erhöht werden. Abbildung 4.6 gibt eine Übersicht der erreichbaren Genauigkeiten wichtiger Fertigungsverfahren sowie die damit verbundenen relativen Kosten.

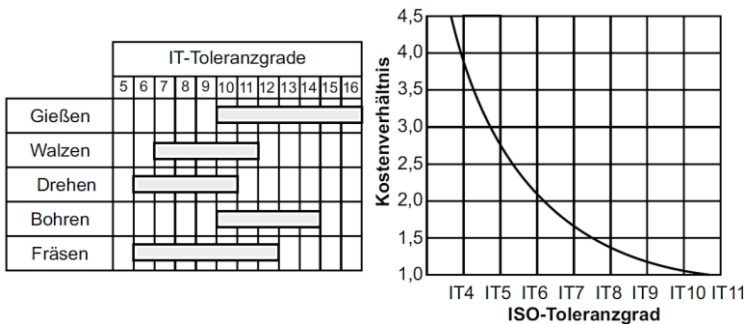


Abbildung 4.6: Durch Fertigungsverfahren erreichbare Genauigkeiten [56]

Der optimale Wärmeübergang ist nur dann zu erreichen, wenn die durch Fertigungsprozesse unvermeidlichen Toleranzen, Unebenheiten und Rauheiten der zu verbindenden Oberflächen egalisiert werden. Bei der Kontaktierung von zwei flachen Oberflächen miteinander, wie z. B. die Leiterplatte und der Kühlkörper, beträgt die effektive Kontaktfläche ohne jegliche mechanische Nachbearbeitung typischerweise nur wenige

Prozente der nominellen⁷ Fläche [57, 58, 59]. Die restliche Fläche ist ein Luftpolster, welches aus Zwischenräumen besteht, in denen die Luft als thermischer Isolator fungiert.

Zur verbesserten Wärmeübertragung an diesen Kontaktflächen nutzt man auf die Applikation angepasste thermische Kontaktwerkstoffe, wobei bei LED-Systemen oft Wärmeleitkleber und -pasten zur Anwendung kommen. Daneben gibt es auch thermische Kontaktelemente und Wärmeleitfolien.

Als Grundsatz ist festzuhalten: alle unterschiedlichen Materialien, unter Beachtung ihrer jeweiligen Spezifikation, müssen betrachtet werden, um eine der Applikation entsprechende, bestmögliche Auswahl zu treffen. Einfluss gebende Faktoren für die Auswahl von Wärmeleitmaterialien sind u.a. der thermische Widerstand, die thermische Impedanz, die Wärmeleitfähigkeit, die elektrische Isolierung oder Leitfähigkeit, der Temperaturbereich, die Durchschlagsfestigkeit, die Umweltverträglichkeit sowie die Shore-Härte und Zugfestigkeit. Darüber hinaus sind eine leichte Handhabung, eine gute Alterungsbeständigkeit und eine lange Lebensdauer wichtige Auswahlkriterien, die es zu berücksichtigen gilt.

Neben der Einhaltung vorgegebener Maß-, Form-, Lage- und Rauheitstoleranzen bestimmt noch eine Vielzahl von weiteren Kriterien die Verfahrensauswahl [55]. Des Weiteren spielen Aspekte wie Umweltverträglichkeit ebenfalls eine Rolle. So wird diese unter Umweltverträglichkeitsgesichtspunkten zunehmend von Fragen der

⁷ Die nominelle Kontaktfläche ist die Fläche, an der sich Körper berühren, die eine ideal glatte Oberfläche haben würden.

Entsorgung, z. B. von Spänen und Kühlschmierstoffen, beeinflusst. Abgesehen von den Anwendungsgrenzen des jeweiligen Verfahrens muss natürlich auch der wirtschaftliche Aspekt bei der Auswahl betrachtet werden.

4.3 PHASE 3: VALIDIERUNG

Eine Bewertung des Thermomanagements im Rahmen des domänenspezifischen Entwicklungsprozesses ist häufig nur mit Hilfe eines Prototyps möglich. Dazu wird im Prozessschritt der Validierung der erarbeitete Lösungsansatz in Form einer Prototypfertigung realisiert, thermisch charakterisiert und bewertet. Die Einteilung sowie die Reihenfolge des Ablaufs und die bestehenden Wechselwirkungen in der Phase der Validierung sind in Abbildung 4.7 dargestellt.

Während der *thermischen Charakterisierung* werden alle für die gesetzten Ziele des Thermomanagements relevanten Daten am Prototyp messtechnisch erfasst. Ein Überblick über die für diesen Zweck eingesetzten Verfahren gibt Abschnitt 4.3.1.

Nach der Vermessung des Prototyps liegen alle erforderlichen Informationen geprüft vor. Basierend darauf erfolgt die *Bewertung* der funktionalen Auslegung des Thermomanagements. Typische Ergebnisse sind die Bestimmung, ob das domänenspezifische Teilsystem die gestellten Anforderungen erfüllt, zusammengefasste Testergebnisse, Beschreibungen der Schwachstellen und Vorschläge zur Systemverbesserung. Weitere Informationen dazu enthält Abschnitt 4.3.2.

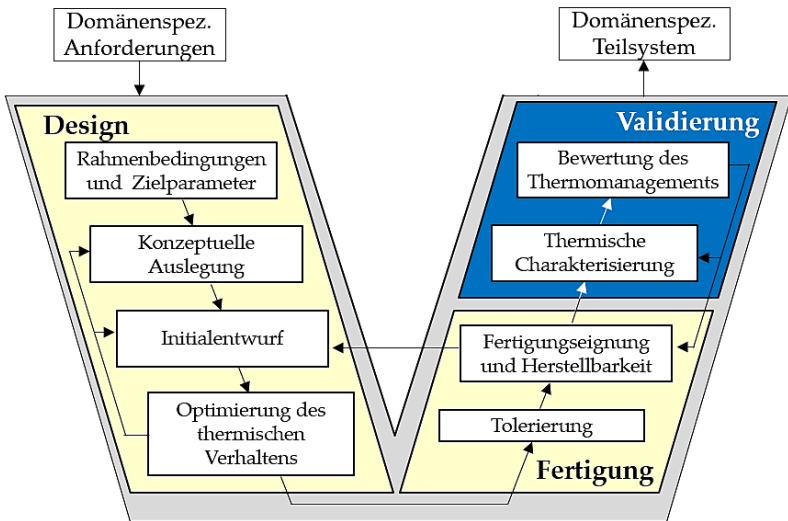


Abbildung 4.7: Prozessablauf in der Phase der Validierung (in blau) bei der Auslegung des Thermomanagements

4.3.1 THERMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Da in einem LED-System verschiedene Arten von Temperaturen bestimmt werden müssen, finden unterschiedliche Messmethoden zur thermischen Charakterisierung des Systems Anwendung. Im Wesentlichen gibt es drei verschiedene Möglichkeiten [12], die sich in ihren Eigenschaften und Einsatzbereichen stark unterscheiden:

- Punktuelle Temperaturmessung
- Messung der Oberflächentemperaturverteilung

- Messung der Chiptemperatur.

Die klassische Art der punktuellen Temperaturmessung ist die Kontaktmessung. Sie beruht auf dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik zugrundeliegenden Prinzip, dass sich bei zwei Objekten, die in Kontakt gebracht werden, an der Kontaktfläche die gleiche Temperatur einstellt [60]. Damit Kontaktmessung lediglich eine punktuelle Temperaturinformation an der Messstelle bestimmt wird, eignet sich dieses Messverfahren insbesondere zur Überprüfung einer Temperatur am Kühlkörper des LED-Systems und zur Bestimmung der Umgebungstemperatur in der Nähe der LED.

Eine weitere Möglichkeit der punktuellen Temperaturmessung kann mit einem Pyrometer erfolgen. Dabei wird Temperatur an einem einzelnen Oberflächenpunkt berührungslos durch Messung mit Hilfe der Thermografie bestimmt, sofern der Emissionsgrad ausreichend genau bekannt ist [61]. Das Thermografie-System detektiert die vom Körper emittierte, temperaturbedingte infrarote Wärmestrahlung, die (je nach den spektralen Eigenschaften) in einer nur wenige Mikrometer tiefen Grenzschicht, der Absorptionslänge für diese Strahlung, unmittelbar an der Oberfläche entsteht.

Mithilfe des bildgebenden Messverfahrens der Pyrometrie lässt sich berührungslose Messung der Oberflächentemperaturverteilung eines LED-Systems realisieren. In [12] ist gezeigt, warum sich die Temperaturverteilungen hierbei gut auflösen ließen, absolute Chiptemperaturen aber kaum messbar sind.

Bei den oben erwähnten berührungslosen Methoden der Temperaturmessung handelt es sich um die sogenannte passive Thermographie, die lediglich Informationen über die Oberfläche eines Körpers liefert. Bei den aktiven Thermographie-Messverfahren in der zerstörungsfreien Prüfung geht es hingegen generell um Untersuchungen des zuvor im Prüfkörper angeregten Wärmeflusses, der durch einen Wärmepuls (Pulsthermographie [62, 63]) oder durch sinusförmige Modulation (Lockin Thermographie [64, 65]) erzeugt wird, insbesondere um seine Störung infolge verborgener Fehler [65]. Diese Untersuchungen erfolgen durch die berührungslose Erfassung von Temperaturfeldern mittels einer Thermografie-Kamera.

Mit Hilfe des thermischen Transienten-Verfahrens kann der thermische Pfad eines Halbleiter-Systems von dessen aktiver Zone bis zur Umgebung zerstörungsfrei charakterisiert werden. Hierbei handelt es sich um eine indirekte Methode der Temperaturmessung. Ausgehend aus der Temperaturabhängigkeit der Vorwärtsspannung der LED kann die Chiptemperatur bestimmt werden [66].

4.3.2 BEWERTUNG DES THERMOMANAGEMENTS

Mit den gewonnenen Messdaten wird ein Vergleich mit dem detaillierten Simulationsmodell möglich. Dabei werden die Unterschiede zwischen Messung und Simulation analysiert und quantifiziert. Werden dabei z. B. unerwartete Abweichungen festgestellt, deren Plausibilität nicht verlässlich nachvollziehbar ist, müssen mit Hilfe einer detaillierten Analyse von Art und Umfang der Abweichungen das Herstellungsverfahren und dessen Parameter modifiziert werden.

Anschließend wird das erarbeitete System anhand der Zielparameter aus Abschnitt 4.1.1 bewertet. Zu diesem Zweck ist hilfreich für jedes an das Thermomanagement gestellte Ziel knapp zu erläutern, inwiefern dieses während der domänenspezifischen Entwicklung umgesetzt ist. Es stellt sich dabei primär die Frage, ob und wie gut das gewünschte thermische Verhalten des LED-Systems bezüglich der Zielsetzung erreicht ist. Der Fokus liegt hierbei auf dem Anteil der validierten Zielparameter des domänenspezifischen Teilsystems. Es wird als Abdeckungsgrad bezeichnet. Der Abdeckungsgrad entspricht dem Quotienten aus geprüften Zielen zur Gesamtheit der Ziele. Hierbei ist zwischen messtechnisch geprüften und anhand der Simulationen validierten Zuständen der Ziele zu unterscheiden. Somit sind zwei Bewertungsgrößen relevant:

- Abdeckungsgrad der messtechnisch validierten Funktionen
- Abdeckungsgrad der anhand der Simulationen validierten Funktionen

Der Abdeckungsgrad der messtechnisch validierten Funktionen soll möglichst hoch sein. Der Grund hierfür ist, dass erst nach der Realisierung in einem Prototyp und dessen Vermessung neben den gewünschten Parametern, auch einige nicht modellierte Effekte identifiziert und behoben werden können. Ist der Abdeckungsgrad der anhand der Simulationen validierten Funktionen größer als der von messtechnisch validierten, muss der Anteil der messtechnisch geprüften Funktionen durch das Wiederholen des Prozessschrittes der Fertigungseignung und Herstellbarkeit erhöht werden.

Eine Möglichkeit zur Darstellung von Performance-Mängeln des Prototyps mit mehreren, gleichwertigen Kategorien stellt das Spinnennetzdiagramm dar. Auf Basis visualisierter Soll-/Ist-Abweichungen in den planungsrelevanten Kenngrößen können bei der technischen Realisierung Abweichungen schnell erkannt und umgehend behandelt werden. Dabei soll das aufgebaute LED-Modul die erwarteten Eigenschaften weder unterschreiten noch übertreffen. Falls dabei mindestens ein Kriterium nicht erreicht wird, kann eine Überarbeitung des optischen Designs nötig werden. Die dazu notwendigen Anpassungen sollen in ein weiteres Funktionsmuster einfließen, bevor das LED-System an die nächste Phase der Produktentstehung, die Produktionssystementwicklung, übergeben wird.

Kapitel 5

THERMOMANAGEMENT IM TOLERANZ- VERGABEPROZESS

Die Vergabe von Toleranzen im Produktentstehungsprozess hat großen Einfluss auf zahlreiche Produkteigenschaften. Aus Sicht der Produktentwicklung sind möglichst enge Toleranzen wünschenswert, um eine sichere Funktionserfüllung und ein ästhetisches Aussehen zu gewährleisten. Aus Sicht der Produktionssystementwicklung sind enge Toleranzen jedoch nachteilig, da sie hohe Fertigungskosten aufgrund von aufwändigeren Schritten der Herstellung, Nachbearbeitung und Produktprüfung nach sich ziehen. Der Toleranzvergabeprozess bildet daher eine Brücke zwischen den Anforderungen an die Produktqualität und ihrer stimmigen Umsetzung entlang der langen Produktentstehungskette. Sowohl das Produkt, als auch die umspannenden Prozesse sind daher toleranzgerecht auszulegen und nachweisbar zu bestätigen [67].

Zu Toleranzen im Thermomanagementprozess ergibt sich kein globales Bild, zu dem sich die einzelnen Teilbereiche schlüssig zusammenfügen. Um den Handlungsbedarf aufzuzeigen, wird in diesem Kapitel zunächst der grundsätzliche Ablauf des Toleranzvergabeprozesses eingehender erläutert. Als nächstes wird auf die funktionsbestimmenden Abweichungen von der Idealgestalt eingegangen, die durch mikrogeometrische Eigenschaften der Bauteile hervorgerufen werden. Eine davon ist der

thermische Kontaktwiderstand. Nachdem Ansätze zur analytischen Bestimmung thermischer Kontaktwiderstände diskutiert werden, finden anschließend experimentelle Untersuchungen zur Analyse der Anwendbarkeit von thermischen Transientenverfahren zur Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstands an realen Test-Systemen statt.

5.1 PRODUKTGERECHTER TOLERANZVERGABEPROZESS

Durch Schwankungen der realen Abweichungen, die z. B. durch Prozessunsicherheit, Fertigungsungenauigkeit, Umgebungseinflüsse, Alterung und Verschleiß verursacht werden, bleiben die Systemparameter und Eingangsgrößen nicht konstant, sondern sind toleranzbehaftet. Das kann zu starken Schwankungen des Systemverhaltens und damit zum Versagen oder zur Verschlechterung der Produktqualität bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen führen. Die Kenntnis von Abweichungen und ihre Informationsbereitstellung durch alle Phasen des Entwicklungsprozesses haben maßgeblichen Einfluss auf die Stimmigkeit und Realisierbarkeit des Toleranzkonzeptes.

Wie Abbildung 5.1 darstellt, liegt dem Toleranzvergabeprozess zunächst stets eine *Toleranzspezifikation* zu Grunde. Diese stellt die Beschreibungssprache dar, die erlaubt, Produkte über ihre nominale Gestalt hinaus zu beschreiben. Weiterhin werden in Forschungsansätzen und Simulationsanwendungen *Toleranzmodelle* herangezogen, die es erlauben einen Funktionszusammenhang zwischen Einzeltoleranzen und Qualitätsmerkmal herzustellen. Die Beschreibungssprache und das Toleranzmodell erlauben es nun verschiedene *Berechnungsmethoden* für die Auswertung des

Funktionszusammenhang anzuwenden. Diese Grundlagen erlauben es, eine *Toleranzanalyse* im Produktentwicklungsprozess zu betreiben. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen, grau markierten Schritte des Toleranzvergabeprozesses näher erläutert.

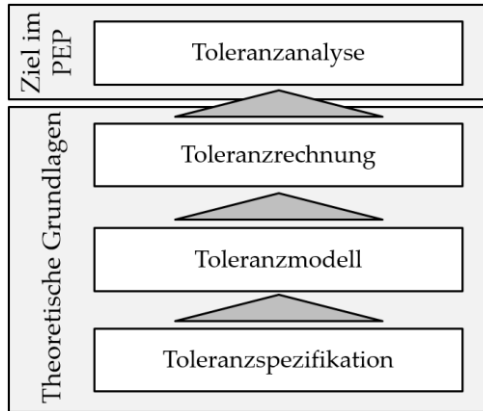


Abbildung 5.1: Toleranzvergabeprozess im Überblick (PEP – Produktentwicklungsprozess) (in Anlehnung an [68])

5.1.1 TOLERANZSPEZIFIKATION

Nach [69] können funktionsbestimmende Abweichungen von Idealgestalt makrogeometrische oder mikrogeometrische Eigenschaften sein. Zu den makrogeometrischen Eigenschaften gehören etwa Maß-, Form- und Lageabweichungen von Geometrieelementen. Mikrogeometrische Kenngrößen sind beispielsweise Oberflächenkennwerte oder Materialeigenschaften. Dabei können die Auswirkungen von vergebenden Maß-,

Form-, Richtungs-, Orts- und Lauftoleranz, die die entsprechenden Abweichungen in der Fertigungsphase einschränken, auf die Funktionalität des Produktes bereits in der Design-Phase des Produktentwicklungsprozesses untersucht werden.

5.1.2 TOLERANZMODELL

Ein geeignetes Toleranzmodell erlaubt die Formalisierung und damit die rechnerunterstützte Verarbeitung der Informationen, wie etwa in Berechnungsmodellen. Für die Beschreibung der Toleranzzonen, vor allem in rechnerunterstützten Umgebungen, wurden im Laufe der Zeit verschiedene Modelle erarbeitet, die auf den internationalen Normenwerken aufbauen. Diese Toleranzmodelle bieten die Möglichkeit, den Einfluss von vergebenen Toleranzen bei den Einzelbauteilen auf die Funktionserfüllung der montierten Baugruppe sowohl numerisch als auch analytisch zu untersuchen. Im Fokus stehen hierbei die möglichen Auswirkungen von abweichungsbehafteter Geometrie auf das Bewegungsverhalten eines Systems. Hierbei lassen sich zwar Varianten der Bauteile erzeugen, die Formänderungen, die durch die mikrogeometrischen Eigenschaften der Bauteiloberflächen hervorgerufen werden, sind jedoch nicht darstellbar. So bleiben dadurch beispielsweise Linien gerade und ebene Flächen bleiben perfekt eben.

5.1.3 TOLERANZRECHNUNG

Basierend auf dem festgelegten Toleranzmodell werden die Toleranzwerte, die für das zu betrachtende System in Bezug auf die Funktionserfüllung gültig sind, in der Toleranzrechnung ermittelt. Dabei werden Maß- oder Toleranzketten in analytischer oder numerischer Form aufgestellt. Nach [53] entstehen Toleranzketten beim Zusammenfügen mehrerer Bauteile zu einer Baugruppe durch die geometrischen Abmaße der Bauteile. Wesentliche Qualitätsmerkmale, die mit Hilfe der Toleranzrechnung untersucht werden, sind Schließmaße. Dabei handelt es sich um ein im Allgemeinen funktionsbestimmendes Maß, der sich in Toleranzketten aus den einzelnen Maßen resultiert. Zu beachten ist, dass das Schließmaß kein in die technische Einzelteilzeichnung eingetragenes Maß ist, sondern eine sich aus den Einzeltoleranzen zusammengesetzte Größe ist. Die sich bildende Toleranz am Schließmaß wird als Schließtoleranz bezeichnet.

Grundsätzlich wird zwischen linearen Maßketten und nichtlinearen Maßketten unterschieden. Linearität liegt vor, falls alle Maße eine geschlossene Vektorkette [54] ausschließlich paralleler Vektoren bilden. In allen anderen Fällen wird die Toleranzkette als nichtlinear bezeichnet.

Um den nichtlinearen oder mehrdimensionalen Fall auf eindimensionale Vektorketten zurückzuführen, sind in den letzten Jahren rechnerunterstützte Simulationen zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel bei der Entwicklung technischer Produkte und zugehöriger Prozesse geworden. In den kommerziellen Programmen haben sich zwei Methoden zur simulationsgestützten Betrachtung von Geometrieabweichungen auf das Bewe-

ungsverhalten eines technischen Systems bereits als Standard durchgesetzt. Diese sind die Maximum-Minimum-Methode (Worst-Case) und die Monte-Carlo-Methode [53, 54, 70].

Ausgehend von einer mathematischen Beschreibung der Baugruppenfunktion wird bei der Worst-Case Analyse der Einfluss der definierten Toleranzgrenzen auf die Schließmaßfunktion untersucht, um besonders einflussreiche Elemente zu identifizieren. Hierbei wird mit Hilfe von deterministischen Simulationen eine geringe Anzahl von Szenarien betrachtet, deren Wahrscheinlichkeitsverteilung individuell differiert ist. Dabei ergibt sich der neue Zustand des Systems eindeutig aus dem vorherigen Zustand und der verbindenden Aktivität. Da das Systemverhalten durch keine zufälligen Ereignisse beeinflusst wird und damit eindeutig und reproduzierbar ist, können die deterministische Simulationen für das Vorhersagen und die anschließende Bewertung des kompletten Systemverhaltens nicht genutzt werden [71].

Der statistische Aspekt der Toleranzen kann hierbei durch Einsatz der Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt werden. Dabei wird aus einer zufälligen Kombination von Toleranzen, die innerhalb eines vorgegebenen Rahmens liegen, ein realistischer Bereich der zu erwartenden Abweichung des realen Systems vom Idealsystem ermittelt. Der Nachteil dieses statistischen Verfahrens liegt in dem erhöhten Rechenaufwand zur Berechnung einer repräsentativen Stichprobe. Die Anzahl der erforderlichen Modellberechnungen steigt exponentiell mit der Anzahl der Toleranzen weiter: Für n Variablen, die jeweils k Werte annehmen können, werden k^n Modellberechnungen benötigt [71].

Wie bereits in Abschnitt 4.1.4 erwähnt, lässt sich das physikalisch komplexe Verhalten des Gesamtsystems während der Auslegung des Thermomanagements nur extrem aufwendig simulieren. Wegen des großen Aufwands für den Aufbau eines numerischen Modells, der mit enormen Rechnerkapazitäten und Simulationszeiten verbunden ist, sind die oben vorgestellten allgemeinen Prinzipien der Toleranzanalyse während der funktionalen Auslegung des Thermomanagements der LED-Systeme nur bedingt anzuwenden.

Einen Ausweg bieten hier analytische Verfahren der Toleranzanalyse. Dabei sollen Ursachen und Wirkungen von Geometrieabweichungen mittels geeigneter Toleranzmodelle korreliert werden. Ist der funktionale Zusammenhang zwischen fertigungsbedingten Toleranzen einzelner Baugruppen den Einzelmassen und den Ausgangsgrößen bekannt, können die gewünschten Kenngrößen mit Hilfe von Taylorverfahren hervorgehen. Die Taylorreihe erlaubt Funktionen in der Umgebung bestimmter Punkte durch Potenzreihen darzustellen. Nach [68, 71] besitzt die Taylorentwicklung im mehrdimensionalen Raum die Form

$$f(M_S \pm a_S) = f(M_S) + \sum_{n=1}^j \frac{1}{n!} \left(\sum_i \pm a_S \frac{\partial f(M_S)}{\partial M_S} \right)^n \quad (5.1)$$

mit

$$f(M_S \pm a_S) = f(M_1 \pm a_1, M_2 \pm a_2, \dots, M_j \pm a_j) \quad (5.2)$$

Dabei bedeutet M_S das Schließmaß und a_S dessen Abweichung ($a_S \geq 0$), die als Funktion f der j Maßkettenglieder mit bekannten Einzelmaßen M_j und Abweichungen a_j berechnet werden. Das Zeichen \pm deutet an, dass genau eine der 2^j Kombinationen der Vorzeichen für die

Einzelmaßtoleranzen eine maximale Schließmasstoleranz ergibt. Weitere Informationen dazu können der Literatur entnommen werden [68].

5.1.4 HANDLUNGSFELD

Aus experimentellen Arbeiten ist bekannt, dass insbesondere die technologisch bedingten Oberflächenkennwerte die fehlerfreie Funktionalität des Thermomanagements beeinträchtigen. Der Grund dafür ist, dass bei der Berührung zweier realer Festkörperoberflächen der Kontakt nur über mikroskopisch kleine Kontaktpunkte erfolgt, die typischerweise nur wenige Prozent der nominellen Fläche ausmachen [57, 58, 59]. Bedingt durch das Rauheitsprofil maschinell bearbeiteter Oberflächen muss der gesamte Wärmestrom durch die reduzierte Gesamtfläche hindurchfließen. Dies führt zu einem Temperatursprung an der Grenzfläche, der proportional zum Wärmestrom über die Grenzfläche ist [72]. Dieser Effekt wird mit Hilfe von thermischen Kontaktwiderständen beschrieben. Für das Thermomanagement sind eine sinnvolle Zusammenfassung und eine transparente Darstellung der ursächlichen Wirkungszusammenhänge von elementarer Bedeutung.

Wie bereits in der Einleitung des Kapitels erwähnt, beeinflusst der Toleranzvergabeprozess die Art der Prüfung der gefertigten Bauteile. Jeder Fertigungsprozess ist abweichungsbehaftet und das Qualitätsmanagement sieht daher die Kontrolle der Qualitätsmerkmale vor. In Prüfungen werden die Ist-Abweichungen resultierend aus dem Fertigungsprozess den Toleranzvorgaben aus der Produktentwicklung gegenübergestellt. Je nach Toleranztyp und –wert sind unterschiedliche Messinstrumente einsetzbar, enge Toleranzen erfordern unter Umständen spezielle kosten-

und zeitaufwändige Prüfeinrichtungen. Die Messunsicherheit des eingesetzten Prüfverfahrens muss außerdem miteinbezogen werden, was die Toleranzgrenzen zusätzlich einengt.

5.2 THERMISCHER KONTAKTWIDERSTAND

Bedingt durch das Rauheitsprofil maschinell bearbeiteter Oberflächen ist der thermische Kontaktwiderstand an der Kontaktstelle stets vorhanden. Da die Wärmeleitfähigkeit von festen Materialien erheblich größer ist als diejenige von Luft, erfolgt der Wärmefluss hauptsächlich über eine Vielzahl, meist ungleichmäßig verteilter Mikrospitzen. Wird in erster Näherung die Wärmeleitung durch die Hohlräume vernachlässigt, so muss in einem stationären Fall der ankommende Wärmestrom $\vec{q}_\infty^* = \dot{Q}_\infty^*/A^*$ durch die reduzierte Kontaktfläche A_K^* fließen. Dies ist in Abbildung 5.2 veranschaulicht. Dadurch ergibt sich eine erhöhte Wärmestromdichte $\vec{q}_K^* = \dot{Q}_\infty^*/A_K^*$ an der Kontaktstelle. Aufgrund des dadurch verursachten erhöhten Temperaturgradienten in x-Richtung ergibt sich in der Nähe der Kontaktstelle ein Temperaturverlauf, der als Verlauf einer über die nominelle Kontaktfläche gemittelten Temperatur interpretiert werden kann. Durch das Extrapolieren der Temperaturverläufe zu beiden Seiten der Kontaktstelle ergibt sich ein Temperatursprung (Abbildung 5.2).

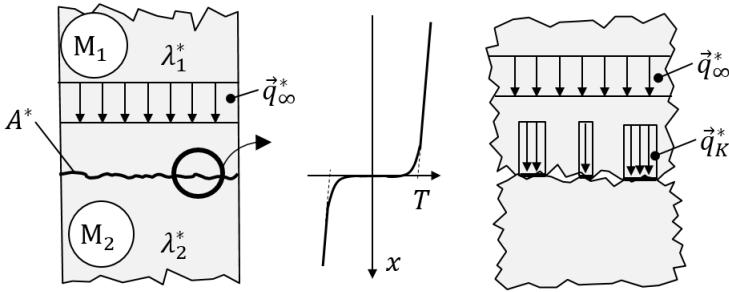


Abbildung 5.2: Wärmestromdichten- und Temperaturverlauf in der Nähe der Kontaktfläche zweier Körper M_1 und M_2 . Da Materialoberflächen in der Regel technisch bearbeitet sind, beträgt die effektive Kontaktfläche ohne jegliche mechanische Nachbearbeitung typischerweise nur wenige Prozent der nominellen Fläche A^* . Diese wird als A^*_K bezeichnet [73].

Der thermische Kontaktwiderstand $R_{th\,K}$ wird oft in Form eines Kontakt-Wärmeübergangskoeffizienten α_K beschrieben, der in den Simulationen des thermischen Verhaltens häufig als Randbedingung zwischen zwei Körpern festgelegt wird:

$$R_{th\,K} = \frac{\Delta T_K}{\dot{Q}_\infty^*} = \frac{1}{\alpha_K \cdot A^*} \quad (5.3)$$

Hierbei ist \dot{Q}_∞^* der Wärmestrom über die Kontaktfläche, ΔT_K der Temperatursprung bedingt durch den thermischen Kontaktwiderstand und A^* die nominelle Kontaktfläche. Haupteinflussgrößen auf den Kontakt-Wärmeübergangskoeffizienten sind die Wärmeleitfähigkeiten der Materialien, die Materialhärte, der Anpressdruck und die Oberflächenrauheiten.

5.2.1 ANALYTISCHE MODELLE

Aus der Literatur sind mehrere explizite Beschreibungen des thermischen Kontaktwiderstandes und somit des Kontakt-Wärmeübergangskoeffizienten basierend auf der theoretischen Analyse des Oberflächenkontaktes bekannt [59, 74, 75]. Diese Modelle gehen von hypothetischen Oberflächen mit mathematisch gut erfassbaren Formen der Mikrospitzen aus, wie Kegel oder Zylinder. Der thermische Kontaktwiderstand wird dabei als eine statische Größe betrachtet. Das bedeutet, dass für eine vorgegebene Kontaktkraft lediglich ein wahrscheinlicher Wert der Kontaktfläche angegeben werden kann. Mit der Variation der wirkenden Kontaktkraft verändern sich die Zahl, Größe und Verteilung dieser Mikroflächen und damit auch der wahrscheinlichste Wert des thermischen Kontaktwiderstandes.

Bei hohen Kontaktkräften mit vielen Mikroflächen ist der thermische Kontaktwiderstand nahezu konstant und kann hauptsächlich über die Mikrogeometrie beschrieben werden. In diesem Fall eignen sich zur Beschreibung des thermischen Kontaktwiderstandes Modelle, die sowohl die Wärmeleitung über die einzelnen Kontaktpunkte R_{thc} als auch die Wärmeleitung durch das eingeschlossene Gas R_{thg} berücksichtigen [76, 77]. Die beiden parallelen Effekte führen zu einem thermischen Kontaktwiderstand, der sich wie folgt berechnen lässt:

$$R_{thK} = \frac{1}{\frac{1}{R_{thc}} + \frac{1}{R_{thg}}} \quad (5.4)$$

Diese Überlegungen zur Physik des thermischen Kontaktwiderstandes führen auf zwei Maßnahmen zu dessen Reduzierung:

- Eine Erhöhung der wirkenden Kontaktkraft zwischen beiden Materialien führt aufgrund der plastischen Verformung von meist ungleichmäßig verteilten Mikrospitzen zu einer Vergrößerung des Flächenanteils A_K^* und damit zu einer Verminderung von ΔT_K .
- Durch das Ausfüllen der Hohlräume mit einer Flüssigkeit, deren Wärmeleitfähigkeit deutlich über derjenigen von Luft liegt, wird die Wärmeübertragung durch den Hohlraum-Flächen-Anteil verstärkt, so dass die lokalen Wärmestromdichten reduziert werden. Dies führt ebenfalls zur Verminderung von ΔT_K .

Dagegen ist bei niedrigen oder ungleichmäßig verteilten Kontaktkräften eine größere Streuung der Werten für den Kontaktwiderstand zu erwarten. Unter Einbeziehung der Makrogeometrie, wie die Welligkeit, kann eine genauere Abschätzung des thermischen Widerstandes erfolgen. Bahrami et al. [78] schlug ein erweitertes Modell der Wärmeübertragung an der Kontaktstelle vor. Der thermische Kontaktwiderstand setzt sich dabei aus dem Festkörperwiderstand $R_{th\ L1}$ bzw. $R_{th\ L2}$, dem Leitungswiderstand durch mikroskopische Kontaktbereiche $R_{th\ S}$, dem Leitungswiderstand durch das Gas bedingt durch die Mikrogeometrie $R_{th\ g}$ und dem Leitungswiderstand durch das Gas bedingt durch die Makrogeometrie $R_{th\ G}$. Der thermische Kontaktwiderstand lässt sich hierbei mit folgender Gleichung beschreiben:

$$\begin{aligned} 1/R_{thK} &= \\ &= 1/\left[\left(1/R_{thS} + 1/R_{thG}\right)^{-1} + R_{thL1} + R_{thL2}\right] + 1/R_{thG} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, sei für die Berechnungen der einzelnen Anteile des thermischen Kontaktwiderstandes an dieser Stelle auf [78, 73] verwiesen. Hier wurde außerdem die Anwendbarkeit dieses analytischen Modells in einer umfassenden Parameterstudie für eine Metall-zu-Metall-Verbindung belegt. Dabei wurde gezeigt, dass von den mechanischen Eigenschaften der Kontaktmaterialien die wirkende Kontaktkraft und die Welligkeit den Wärmetransport an der Kontaktstelle am stärksten beeinflussen. Die analytischen Ergebnisse wurden anschließend mit experimentell gewonnen Erkenntnissen verglichen. Die quantitative Übereinstimmung mit den vorgestellten Ergebnissen der Parameterstudie ist im Wesentlichen sehr gut.

5.2.2 MESSVERFAHREN

Aufgrund der geometrischen Verhältnisse in der Kontaktzone werden Zahlwerte für den thermischen Kontaktwiderstand fast ausschließlich empirisch ermittelt. Selbst theoretische Modellansätze weisen hierbei nur halbempirischen Charakter auf. Die Vielzahl von möglichen Materialpaarungen und verschiedenen Oberflächenstrukturen lassen entweder nur sehr grobe Angaben für eine größere Anzahl von Fällen zu oder aber genauere Werte für exakte definierte Situationen [74, 77, 73].

Da die quantitativen Merkmale zur Funktionserfüllung der montierten Baugruppe einer messbaren physikalischen Größe zugeordnet werden,

ist es wichtig, die vereinbarten Toleranzen auch mittels Messungen entlang der Prozesskette in geeigneten Stufen zu bestätigen. Je nach Toleranztyp und –wert sind unterschiedliche Messinstrumente einsetzbar, wobei enge Toleranzen unter Umständen spezielle kosten- und zeitaufwändige Prüfeinrichtungen erfordern. Das Augenmerk liegt hierbei auf der messtechnischen Erfassung von mikrogeometrischen Eigenschaften der Bauteiloberflächen.

Nach der grundlegenden Definition (s. S. 113) ist der thermische Kontaktwiderstand an der Kontaktstelle eine mikroskopische Größe, da er auf den Wärmefluss über eine Vielzahl der ungleichmäßig verteilten Mikrospitzen zurückgeht und damit mit der Anzahl der an den Grenzflächen zugänglichen Mikrozustände verbunden ist. Ein wichtiger Aspekt von Gleichung (5.2) ist hierbei die Verknüpfung des thermischen Kontaktwiderstandes mit der makroskopisch messbaren Größe des Temperatursprungs ΔT_K . Mithilfe von Berührungsthermometern werden die kollektiven Effekte sehr vieler Teilchen erfasst, wobei über die individuellen Eigenschaften der einzelnen Teilchen hinweggemittelt wird. Da alle Messaufnehmern von Berührungsthermometern stets nur ihre eigene Temperatur messen, ist es erforderlich, dass diese möglichst weitgehend mit der Temperatur des Messobjektes übereinstimmen. Dazu kommen auch ungenügend reproduzierbare thermische Kontaktwiderstände zwischen dem Sensor und dem Messobjekt und die Verfälschung des ursprünglichen Temperaturfeldes vom Messobjekt wegen der Änderung von den Wärmetransportbedingungen nach dem Aufsetzen des Fühlers.

Abhilfe kann dabei das thermische Transientenverfahren schaffen, wobei der ganze thermische Pfad realer Halbleitersysteme von der Sperr-

sicht bis zur Umgebung zerstörungsfrei charakterisiert werden kann. Dabei wird aus der Messung der Änderung der Vorwärtsspannung eines zu betrachtenden Halbleiters auf die Änderung seiner Chiptemperatur geschlossen, wenn dieser Halbleiter mit konstantem Strom betrieben wird [66]. Ausgehend aus dieser Temperaturabhängigkeit der Vorwärtsspannung des Halbleiters wird direkt seine Chiptemperatur gemessen, da kein thermischer Übergang in einen Kontaktfühler entsteht. Da dabei keine zusätzliche elektrische Verbindung zur Spannungsmessung benötigt wird, wird der ursprüngliche thermische Pfad im Messobjekt auch nicht verfälscht.

MESSPRINZIP

Zur Anwendung dieses Messprinzips kann ein kommerzielles Messsystem mit dem Namen T3Ster der Firma Mentor Graphics verwendet werden [79]. Dabei wird die zeitliche Änderung der Chiptemperatur eines Halbleiters zwischen zwei stabilen Temperaturzuständen aufgezeichnet. Um diese Temperaturänderung zu erzeugen, wird der Halbleiter selber als Heizung des Systems verwendet. So wird er, bevor die Aufnahme der Messwerte beginnt, mit einem konstanten Heizstrom I_h solange betrieben, bis das System sich im thermisch stabilen Zustand T_{j1} befindet, wobei eine Verlustleistung P_{H1} hervorgerufen wird.

Wird der stabile Zustand erreicht, so kann die eigentliche Messung beginnen, indem es auf den Strom I_m umgeschaltet wird. Die dabei entstehende Verlustleistung wird als P_{H2} bezeichnet. Dieses Umschalten löst die Messung der Vorwärtsspannung des Halbleiters mit einer Zeitauflösung von einer Mikrosekunde auf [80]. Dabei wird die Chiptemperatur

des Halbleiters aufgrund der veränderten Verlustleistung, die am Halbleiter durch das Umschalten des Heizstroms I_h auf den Messstrom I_m hervorgerufen wird, auf den neuen thermisch stabilen Zustand T_{J2} zustreben (Abbildung 5.3).

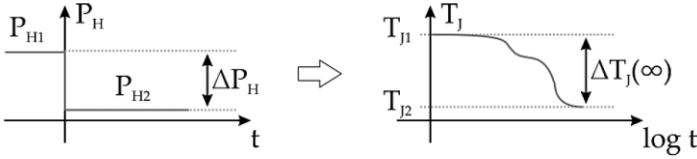


Abbildung 5.3: Die LED wird mit einer konstanten Heizleistung P_{H1} betrieben, bis sie den thermisch stabilen Zustand T_{J1} erreicht hat. Nach dem Umschalten auf eine neue konstante Leistung P_{H2} strebt die LED dem thermisch stabilen Zustand T_{J2} entgegen. Dieses Verhalten kann über die Messung der Vorwärtsspannung aufgezeichnet werden [79]

Um aus der vermessenen Spannung eine Aussage über die Änderung der Chiptemperatur machen zu können, wird im nächsten Schritt einer bestimmten Spannungsänderung eine Temperaturänderung zugeordnet. Dieser Vorgang wird als Kalibrierung bezeichnet.

Das Ergebnis der Messung ist schließlich die zeitliche Abhängigkeit der Änderung der Chiptemperatur ΔT_{J12} zwischen den stabilen Temperaturen T_{J1} und T_{J2} . Diese Temperaturänderung ΔT_{J12} im zu betrachtenden Halbleiter-System berechnet sich folgendermaßen:

$$\Delta T_{J12} = T_{J2} - T_{J1} = Z_{th} \cdot (P_{H2} - P_{H1}) \quad (5.6)$$

wobei Z_{th} die transiente, zeitabhängige thermische Widerstand (thermische Impedanz) ist. Diese enthält die ganze Information über den thermischen Pfad, die dann bei der Auswertung mathematisch berechnet wird [79].

AUSWERTUNGSPRINZIP

Nach [79] lassen sich thermische Systeme mithilfe von thermischen Widerständen $R_{th,i}$ und thermischen Kapazitäten $C_{th,i}$ durch ein lineares zeitinvariantes RC-Netzwerk beschreiben (Gleichung (2.27)). Da reale thermische Systeme nicht konzentriert, sondern verteilt sind, geht die Anzahl der Elemente im erhaltenen Foster-Netzwerk gegen unendlich ($n \rightarrow \infty$). Dabei wird das Summenzeichen in Gleichung (2.27) durch ein Integral ersetzt:

$$\Delta T_J(t) = P_{th} \cdot \int_0^{\infty} R(\tau) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) d\tau \quad (5.7)$$

So entsteht aus den diskreten thermischen Zeitkonstanten τ_i das sogenannte Zeitkonstantenspektrum und aus den einzelnen thermischen Widerständen eine kontinuierliche Funktion $R(\tau)$. Aus dem vom Zeitkonstantenspektrum wird dann eine Diskretisierung gemacht, so dass man zu etwa 100 bis 200 einzelnen konzentrierten Elementen eines Foster-Netzwerkes gelangt. Daraus wird anschließend mithilfe der Wärmenetzmethode und eines nicht stationären Ersatzschaltbildes aus Abschnitt 2.4.1 die innere Struktur des thermischen Pfades bestimmt. Diese Foster-Cauer Transformation wird aber in dieser Arbeit nicht genauer betrachtet wird. Sie kann z. B. in [81] gefunden werden. Das Ergebnis

lässt sich anhand einer sogenannten integralen Strukturfunktion veranschaulichen, die den eindimensionalen Wärmepfad von der aktiven Zone bis zur Umgebung abbildet.

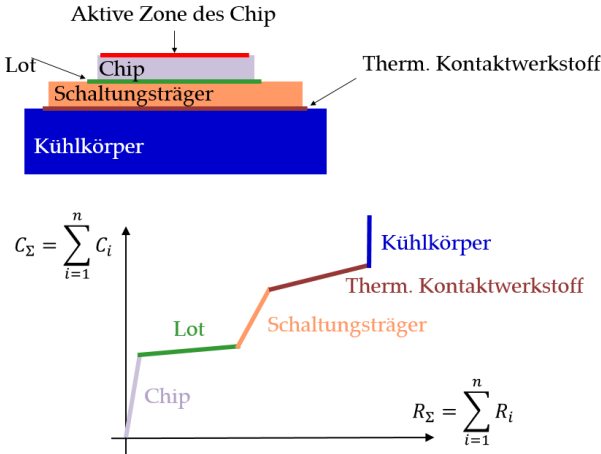


Abbildung 5.4: Die idealisierte integrale Strukturfunktion, wie sie sich theoretisch ausbilden sollte (in Anlehnung an [66])

Die schematische Form dieser Strukturfunktion wird in Abbildung 5.4 gezeigt und besteht aus der logarithmischen Auftragung der Wärmekapazität über dem linearen thermischen Widerstand. Die Bereiche mit konstanter Steigung in der Strukturfunktion können jeweils verschiedenen Bauteilen im thermischen Pfad zugeordnet werden, wodurch sich die Werte des Widerstandsnetzes nach Cauer bestimmen lassen. Bei steilen Bereichen der integralen Strukturfunktion, die ein niedriges Verhältnis R_{th}/C_{th} aufweisen, handelt es sich dabei um große, gut wärmeleitende Bestandteile wie Metalle. Flache Bereiche haben dagegen ein großes zu

Verhältnis R_{th}/C_{th} und weisen somit auf kleinere Bestandteile mit niedriger Wärmekapazität hin, wie zum Beispiel Lötkontakte [66].

In der Realität sind die entsprechenden Bereiche der Strukturfunktion nicht so steil oder flach sind, wie es bei der ideellen integralen Strukturfunktion der Fall ist, so dass anhand nur dieser Strukturfunktion sich einzelne abschnittbezogene thermische Widerstände nur schwer ermitteln lassen. Abhilfe schafft die Betrachtung der differentiellen Strukturfunktion, die die Änderung der thermischen Kapazitäten über dem thermischen Widerstand zeigt. Die einzelnen Bereiche lassen sich hier dadurch erkennen, dass beim Aufeinandertreffen zweier Materialien im Wärmepfad sich die Zunahme der thermischen Kapazität stark verändert. Dies liegt an dem Umstand, dass sich die Kapazität eines Materials mit seiner Masse und damit, bei Beibehaltung seiner Form, mit seiner Dicke linear verändert. Da unterschiedliche Materialien unterschiedliche spezifische Wärmekapazitäten aufweisen, ergibt sich beim Übergang zwischen Materialien eine starke Änderung der thermischen Kapazitäten. So kann bei einem lokalen Maximum der Funktion von einem neuen Abschnitt ausgegangen werden.

5.3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Zur Bestimmung von thermische Kontaktwiderstände mittels des thermischen Transientenverfahrens kann die Literatur bislang nur wenige Ergebnisse vorstellen. [73, 76] zeigen die Untersuchungsergebnisse der Änderung der Wärmeübertragung an einer Kontaktstelle beim Einsatz von unterschiedlichen thermischen Kontaktwerkstoffen bei definierten Randbedingungen wie der Anpressdruck und die Oberflächenrauheiten.

In der LED-Technik wird ein Großteil aller Fügevorgänge mittels Verschraubungen realisiert, wobei der Anpressdruck unbekannt ist und vor allem seine Verteilung über die Kontaktfläche nicht konstant ist.

Das Ziel der folgenden experimentellen Untersuchungen ist die Evaluierung der Reproduzierbarkeit und somit der Zuverlässigkeit des thermischen Transientenverfahren zur Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstands an realen Test-Systemen. Hierzu wird der bestehende Zusammenhang zwischen dem thermischen Kontaktwiderstand und der Kontaktkraft in einer Schraubenverbindung verdeutlicht und die Reproduzierbarkeit dieses Messsystems anhand des berechneten Variationskoeffizienten zweier Messreihen aufgezeigt.

5.3.1 VORBEREITUNG DER TEST-SYSTEME

Die experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstandes werden an zwei Test-Systemen mit jeweils 15 Einheiten durchgeführt. Die beiden Test-Systeme unterscheiden sich in der Lösbarkeit der zu untersuchenden Verbindungen. Während mit dem ersten Test-System mehrere lösbare Verbindungen realisiert werden, handelt es sich beim zweiten Test-System um eine unlösbare Verbindung.

Jedes Test-System besteht aus einer Wärmequelle, einer Leiterplatte und einem Kühlkörper, die eine zu untersuchende Kontaktstelle bilden. Als Wärmequelle kommt eine Diode SBR10U200P5 [82] zum Einsatz. Der Grund für den Einsatz einer Diode ist, dass sie kein Licht abstrahlen und damit keine weitere Betrachtung möglicher Fehlerquellen der Strahlungs-

messung benötigt wird. Die Diode wird auf einer 25 mm x 25 mm großen Metallkernplatine mittels Reflow-Lötverfahren befestigt. Dabei handelt es sich um eine Aluminiumkern-Leiterplatte mit Schichtdicken 1 mm für den Metallträger aus Aluminium, 100 µm für die Isolationsschicht mit der Wärmeleitfähigkeit 1,3 W/mK und 35 µm für die Layout-Lage aus Kupfer. Die Lotschicht beträgt ca. 35 µm. Darüber hinaus wird die Platine mit vier Montagebohrungen mit 3,2 mm Durchmesser versehen. Als Kühlkörper dient ein gefräster Aluminium-Block mit den Maßen 40 mm x 40 mm x 4 mm und vier durchgehenden M3-Gewinden.

Eine lösliche Verbindung im ersten Test-System wird mittels Verschraubung realisiert. Die Größe der wirkenden Kontaktkraft hängt dabei direkt mit dem Anzugsdrehmoment der vier Schrauben zusammen. Das Einstellen des definierten Anzugsdrehmomentes erfolgt mit einem Drehmoment-Schraubendreher der Firma Schumann mit einer einstellbaren Mikrometer-Skala im Bereich zwischen 1 Ncm und 10 Ncm. Diese kraftschlüssige Schraubenverbindung wird anschließend durch das Einfügen einer Wärmeleipaste oder eines Wärmeleitpads zu einer lösbaren stoffschlüssigen Verbindung überführt.

Eine unlösliche Verbindung des zweiten Test-Systems entsteht durch das Zusammenlöten einer Leiterplatte mit einem Kühlkörper. Dafür werden die Kontaktoberflächen von jeweils 15 bestückten Leiterplatten und Aluminium-Kühlkörpern zuerst mit einem 3 µm dicken Kupfer-Schicht mittels PVD-Verfahren⁸ überzogen und dann mittels Reflow-Lötverfahren

⁸ Der Begriff physikalische Dampfphasenabscheidung (von engl. „Physical Vapour Deposition“, kurz PVD), bezeichnet eine Gruppe von vakuumbasierten Beschichtungsverfahren. Dabei wird mit-

verbunden. Bei der anschließenden Inspektion mittels Röntgenmikroskopie wird die Qualität der entstehenden Verbindungen untersucht. Dafür wird die an der Hochschule Esslingen zur Verfügung stehende Prüf- und Inspektionsanlag XD6500 der Firma Nordson DAGE verwendet. Anhand der Röntgen-Durchlicht-Aufnahmen werden im Gefüge auftretende Defekte wie Risse, Poren oder Lunker nicht nur visualisiert, sondern auch bezüglich ihres Kontaktfläche vermessen (Abbildung 5.5). Die entsprechenden Röntgen-Durchlicht-Aufnahmen der 15 Einheiten des zweiten Test-Systems sind in Anhang A gezeigt.



Abbildung 5.5: Eine Einheit der unlösbaren stoffschlüssigen Verbindung (links) und dazu gehörige Röntgen-Durchlicht-Aufnahme der Gefüge (rechts)

5.3.2 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Aus Vergleichbarkeitsgründen wird das zu untersuchende Test-System in der Mitte eines 340 mm x 340 mm x 340 mm großen Plexiglastestens

hilfe physikalischer Verfahren das Ausgangsmaterial in die Gasphase überführt. Das gasförmige Material wird anschließend zum zu beschichtenden Substrat geführt, wo es kondensiert und die Zielschicht bildet.

aufgehängt. Dieser hat die Aufgabe, von außen unwillkürlich ausgelöste Luftströmungen, die z. B. durch das Öffnen der Labortüren oder durch das Vorbeigehen von Mitarbeiter verursacht sind, von der Messung fern zu halten, um reproduzierbare, aussagekräftige Messergebnisse zu erzielen. Um die Umgebungstemperatur dabei möglichst konstant zu halten, befindet sich der Aufbau in einem klimatisierten Raum, in dem die Temperatur bei 25 °C mit einer Abweichung von ± 1 °C gehalten wird.

Zur Messung wird ein kommerziell verfügbares Messsystem T3Ster des Herstellers Mentor Graphics Corporation eingesetzt [79]. Der Heiz- und der Messstrom betragen dabei $I_h = 2$ A und $I_m = 10$ mA. Die Heiz- und Abkühlzeit werden bei jeder Messung auf $t_h = t_m = 5400$ s = 1,5 h festgelegt.

Anschließend findet die Kalibrierung statt. Dafür wird die bestückte Leiterplatte (abhängig von Test-System mit oder ohne den Kühlkörper) auf einem Thermostat aufgebracht, dessen Kühlfläche mithilfe eines Peltierelements auf einer konstanten, regelbaren Temperatur gehalten wird. Da die Entwärmung der Diode dabei vollständig über diese Kühlfläche erfolgt, wird die Kühlflächentemperatur als Umgebungstemperatur angesehen. Bei der Kalibrierung wird die Änderung der Spannung ausgehend von 25 °C bis zu 85 °C in 5 °C Schritten gemessen. Die Messwerte werden nach einer Stabilisierungsphase von 120 s aufgezeichnet. Dabei ist ein stabiler Zustand des zu kalibrierenden Systems durch die maximal zulässige Temperaturänderung ΔT_{stab} und die Spannungsänderung ΔU_{stab} während der Stabilisierungsphase definiert. Diese werden auf $\Delta T_{stab} = 0,01$ °C und $\Delta U_{stab} = 10^{-5}$ V festgelegt.

5.3.3 BEWERTUNG DER VERBINDUNGQUALITÄT

Zunächst wird die integrale Strukturfunktion am Beispiel einer lösbaren Verbindung analysiert, die in Abbildung 5.6 (oben) dargestellt ist. Dabei handelt es sich um eine Einheit des ersten Test-Systems, womit eine kraftschlüssige wurde. Der thermische Gesamtwiderstand des Halbleiter-Systems, der sich aus der Summe der Einzelwiderstände im Wärmepfad von der Sperrschicht zur Umgebung zusammensetzt, beträgt hier $R_{th JA} = 34,4 \text{ K/W}$.

Abbildung 5.6 (unten) zeigt die differentielle Strukturfunktion der betrachteten Einheit der kraftschlüssigen Schraubenverbindung. Gleich zu Beginn der Kurve ist ein markanter Peak bei $0,5 \text{ K/W}$ zu erkennen. Bei diesem Abschnitt der Strukturfunktion handelt es sich um den thermischen Widerstand des Halbleiters mit mehreren Verbindungsschichten. Zwischen dem Halbleitermaterial und dem Chipträger ergibt sich der thermische Gesamtwiderstand der Diode zu $1,1 \text{ K/W}$. Des Weiteren geht die Wärme über die Leiterplatte sowie die Schrauben, die die Leiterplatte am Kühlkörper befestigen. Der thermische Widerstand dieses Bereiches des Wärmepfades liegt bei $10,4 \text{ K/W}$. Anschließend folgt der thermische Widerstand des Kühlkörpers von $22,9 \text{ K/W}$, an dessen Ende die Strukturfunktion gegen unendlich strebt, da es sich bei der Umgebung um ein nahezu unerschöpfliches Potential handelt, Wärme aufzunehmen.

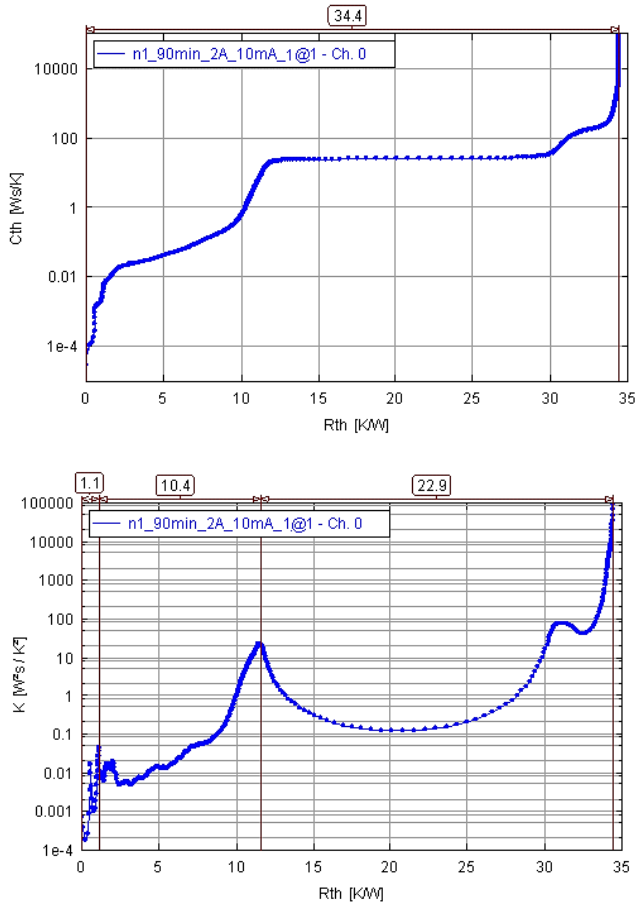


Abbildung 5.6: Integrale (oben) und differentielle (unten) Strukturfunktion am Beispiel einer kraftschlüssigen Schraubenverbindung

Da es sich beim thermischen Kontaktwiderstand nicht um eine zusätzliche Materialschicht handelt, kann bei der oben beschriebenen Analyse kein Bereich der Strukturfunktion dem thermischen Kontaktwiderstand zugeordnet werden. Der thermische Kontaktwiderstand verbirgt sich dennoch im Verlauf der Strukturfunktion. Um die entsprechende Stelle der Strukturfunktion zu identifizieren, wird der Aufbau der betrachteten Einheit modifiziert, indem auf dem thermischen Pfad von Wärmequelle zu Umgebung der zu untersuchende thermische Kontaktwiderstand durch die Änderung der Anziehdrehmomente der vier Schrauben verändert wird.

Abbildung 5.7 zeigt die drei übereinander gelegten Strukturfunktionen der gleichen Einheit der lösbaren Verbindung bei Anziehdrehmomenten 1 Ncm, 5 Ncm und 10 Ncm, wobei die vier Schrauben das gleiche Drehmoment aufweisen. Den einzelnen Drehmomenten sind in derselben Reihenfolge die Kurven mit den Farben blau (1 Ncm), schwarz (5 Ncm) und rot (10 Ncm) zuzuordnen. Die Grafiken machen deutlich, dass die Änderung der Anpresskraft eine Änderung des Wärmeflusses im Bereich der eingeebneten Flächen an der Kontaktstelle verursacht. Es ist ersichtlich, dass sowohl die integrale als auch die differentiellen Strukturfunktionen bis zum Wert des thermischen Widerstandes bei ca. 8,6 K/W übereinstimmen. Ab diesem Punkt findet eine Trennung der Strukturfunktionen statt. Je größer dabei die Anziehdrehmomente der Schrauben sind, umso steiler steigen die entsprechenden Strukturfunktionen an. Die Messungen zeigen, wo im Wärmepfad der zu untersuchende thermische Kontaktwiderstand beginnt und welche Form dieser Abschnitt im Diagramm der Strukturfunktion hat.

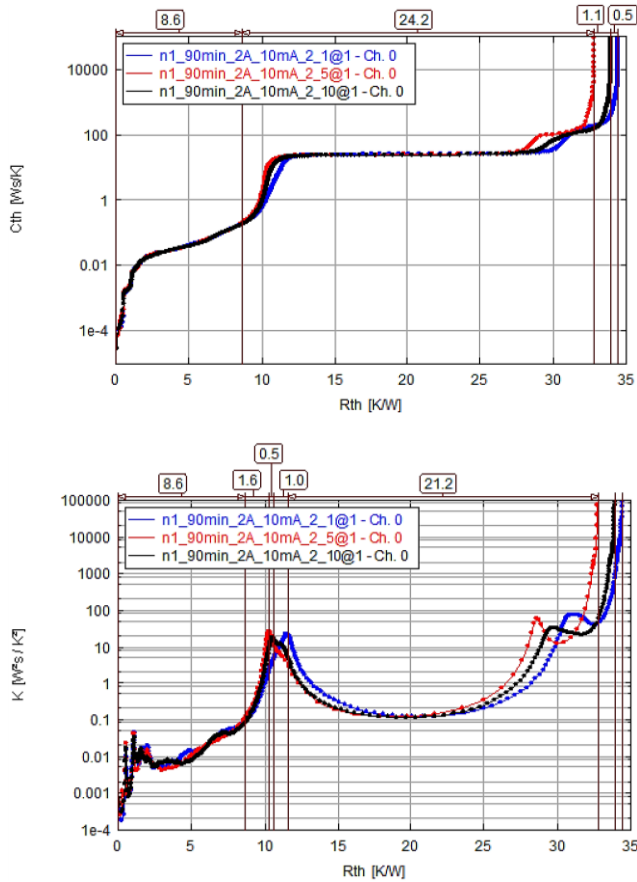


Abbildung 5.7: Integrale (oben) und differentielle (unten) Strukturfunktionen am Beispiel der Schraubenverbindung bei unterschiedlichen Anziehdrehmomenten der vier Schrauben: 1 Ncm in blau, 5 Ncm in rot und 10 Ncm in schwarz

Grundsätzlich sind alle durch Messung ermittelten physikalischen Messwerte nur bedingt genau, sie unterscheiden sich vom gesuchten wahren Wert durch Unsicherheiten. Im Rahmen dieser Arbeit wird besondere Aufmerksamkeit auf den Einfluss des Messobjektes bzw. dessen Aufbaus auf das Messergebnis gelegt.

Tabelle 5.1 fasst die thermischen Einzelwiderstände der 15 Einheiten der lösbaren Verbindung zusammen, wobei jede Einheit bei den drei Anziehdrehmomenten (1 Ncm, 5 Ncm und 10 Ncm) der vier Schrauben gemessen wurde. Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Messungen werden die einzelnen Mittelwerte und die entsprechenden relativen Standardabweichungen berechnet, wobei eine größere Standardabweichung eine stärkere Streuung des Mittelwertes angibt.

Tabelle 5.1: Detaillierter Aufschluss über die gemittelten Messergebnisse des ersten Test-systems mit 15 Einheiten einer lösbaren Schraubenverbindung bei unterschiedlichen Anziehdrehmomenten der vier Schrauben

Thermischer Widerstand [K/W]	Anziehdrehmoment		
	1 Ncm	5 Ncm	10 Ncm
Diode	$1,1 \pm 1,2\%$	$1,1 \pm 1,0\%$	$1,1 \pm 1,0\%$
Leiterplatte	$10,3 \pm 1,1\%$	$9,4 \pm 1,3\%$	$9,1 \pm 1,1\%$
Kühlkörper	$22,7 \pm 3,3\%$	$23,1 \pm 2,7\%$	$22,5 \pm 2,2\%$
Gesamtsystem	$34,6 \pm 3,1\%$	$33,6 \pm 2,5\%$	$32,7 \pm 1,8\%$

Aus Tabelle 5.1 geht hervor, dass während sich bei allen Messungen der gleiche thermische Widerstand der Diode ergibt, unterscheiden sich die gemessenen thermischen Widerstände der Leiterplatte zwischen den drei

Verbindungskräften im Maximum um 1,2 K/W. Die Ursache liegt darin, dass mit größerem Anziehdrehmoment der Schrauben ein stärkeres Ein-ebnen von Oberflächenrauheiten der Auflageflächen unter dem Schrau-benkopf, sowie in den Trennfugen zwischen den Platten stattfindet. Dadurch wird die Wärme effektiver über die Kontaktstelle zum Kühl-körper transportiert. Außerdem zeigt die Tabelle 5.1 die Änderung des thermischen Widerstandes des Kühlkörpers mit zunehmendem Anzieh-drehmoment. Der Grund dafür liegt im oben beschriebenen Effekt des thermischen Kontaktwiderstandes. Bei niedrigsten Anziehdrehmomen-ten der vier Schrauben von 1 Ncm ist der Wärmetransport an der Kon-taktstelle so verhindert, dass es zur Steigerung der Oberflächentempera-tur am Kühlkörper und somit zur Änderung der Luftzirkulation an seinen Oberflächen führt. Dies führt dazu, dass die gemessenen zeitli-chen Abhängigkeiten der Änderung der Chiptemperatur ΔT_{12} zwischen zwei thermisch stabilen Zuständen sich unterscheiden. Obwohl es sich hier um das gleiche mechanische Test-System handelt, werden unter-schiedliche thermische Pfade mithilfe der Foster-Cauer Transformation berechnet. Damit erklärt sich die Änderung der Strukturfunktion des ein-dimensionalen Wärmepfades der zu betrachtenden Einheit bei unter-schiedlichen Anziehdrehmomenten. Schließlich verursacht ein kleineres Anziehdrehmoment der Schrauben einen niedrigen Mittelwert und eine größere Streuung der Einzelwerte für den thermischen Widerstand des Kühlkörpers.

Abbildung 5.8 zeigt die Strukturfunktionen der drei Beispiele, womit vier unterschiedliche Verbindungen bei identischen Messeinstellungen unter-sucht wurden. Bei der ersten und der zweiten Verbindung handeln um zwei Einheiten des zweiten Test-Systems, womit eine unlösbare stoff-

schlüssige Verbindung realisiert wurde. Anhand der Röntgen-Durchlicht-Aufnahmen ergibt sich eine relative Kontaktfläche von 64,1% und 41,7%. Bei der dritten zu untersuchenden Verbindung handelt es sich um eine Einheit einer lösbaren Schraubenverbindung, wobei alle Schrauben das gleiche Anziehdrehmoment von 10 Ncm aufwiesen. Die vierte zu betrachtende Verbindung wird mit Hilfe der oben beschriebenen lösbaren Schraubenverbindung realisiert, wobei eine Wärmeleitpaste auf die Kontaktfläche aufgetragen wurde. Dadurch entsteht eine gemischte Verbindung.

Da der thermische Pfad von der Wärmequelle ausgehend, zunächst bei allen Verbindungen identisch ist, ähneln sich die Verläufe der Strukturfunktionen, bis die Messkurven der unlösbaren stoffschlüssigen Verbindungen bei ca. 8,5 K/W deutlich früher als die anderen Kurven ansteigt. Die markante Verschiebung der Steigung der roten und der blauen Kurven gegenüber der grünen und der schwarzen Kurve um ca. 1,4 K/W resultiert aus der Größenabnahme der über die Mikrospitzen wärmeleitenden Kontaktfläche. Während bei der kraftschlüssigen Schraubenverbindung sie typischerweise nur weniger Prozente der nominellen Fläche ausmachen, beträgt die Größe der Kontaktfläche der unlösbaren stoffschlüssigen Verbindungen mehr als 40%. Die Grafiken zeigen deutlich, dass der Einsatz der Wärmeleitpaste den Wärmetransport an der Kontaktstelle zwar verbessert, ist dennoch nicht so effizient, wie er bei der unlösbaren stoffschlüssigen Verbindung ist. Der Grund hierfür ist, dass die Hauptaufgabe der Wärmeleitpaste nicht im Ausgleich von Unebenheiten oder mechanischen Toleranzen besteht, sondern im Auffüllen der Rautiefen, die z. B. durch das Planfräsen einer Oberfläche entstehen.

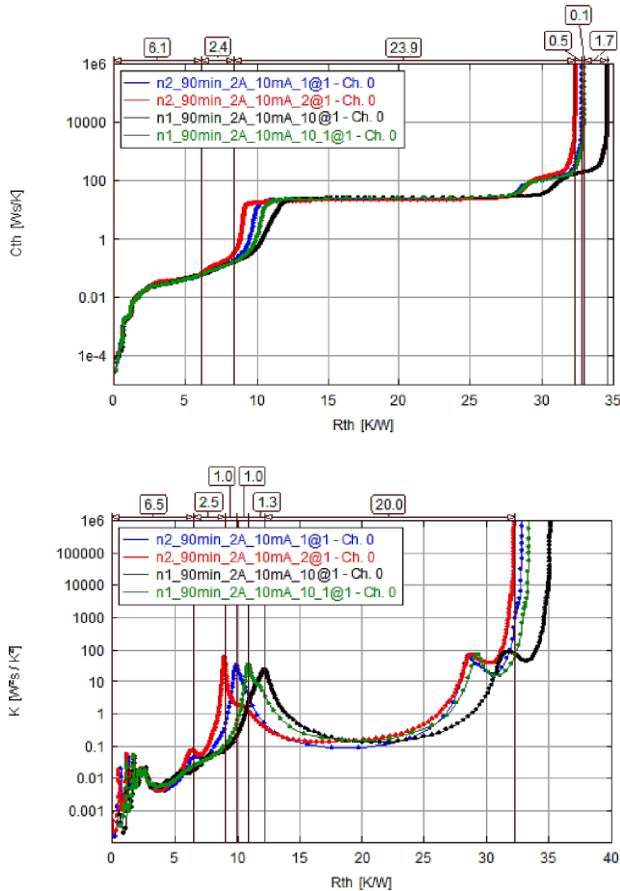


Abbildung 5.8: Integrale (oben) und differentielle (unten) Strukturfunktionen der vier unterschiedlichen Verbindungen: eine unlösbare stoffschlüssige Verbindung mit der relativen Kontaktfläche von 64,1% in blau und von 41,7% in rot, eine lösbare Schraubenverbindung ohne Wärmeleitpaste in schwarz und mit der Wärmeleitpaste in grün

Tabelle 5.2 fasst die Werte der gemittelten thermischen Einzelwiderstände der 15 Einheiten der unlösbaren stoffschlüssigen Verbindung zusammen. Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Messungen werden die einzelnen Mittelwerte und die entsprechenden relativen Standardabweichungen berechnet.

Tabelle 5.2: Detaillierter Aufschluss über die gemittelten Messergebnisse sowohl des ersten Test-Systems einer lösbaren Schraubenverbindung als auch des zweiten Test-Systems einer unlösbaren stoffschlüssigen Verbindung mit jeweils 15 Einheiten

Thermischer Widerstand [K/W]	Lösbare Schraubenverbindung mit Anziehdrehmom. 10 Ncm		Unlösbare stoffschlüssige Verbindung
	ohne Wärmeleitpaste	mit Wärmeleitpaste	
Diode	$1,1 \pm 1,0\%$	$1,1 \pm 1,2\%$	$1,1 \pm 1,0\%$
Leiterplatte	$9,1 \pm 1,1\%$	$9,2 \pm 2,3\%$	$8,3 \pm 2,1\%$
Kühlkörper	$22,5 \pm 2,2\%$	$22,5 \pm 1,9\%$	$23,6 \pm 1,9\%$
Gesamtsystem	$32,7 \pm 1,8\%$	$32,8 \pm 2,0\%$	$33,0 \pm 1,9\%$

Wie aus der Tabelle hervorgeht, wird eine relativ hohe Reproduzierbarkeit der Messungen erreicht. Hierbei lässt sich eine vergleichbar große Streuung von 2,3% um den arithmetischen Mittelwert für die Leiterplatte der lösbaren Schraubenverbindung mit der Wärmeleitpaste lässt sich dadurch erklären, dass die Homogenität und Reproduzierbarkeit der sich einstellenden Schichtdicken an der Kontaktstelle immer fraglich ist. Daher ist es grundsätzlich empfehlenswert der Auftrag von Wärmeleitpaste

im Siebdruckverfahren. Mit diesem Verfahren ist neben einer der Kontaktstelle individuell angepassten optimierten Verteilung der Wärmeleitpaste auch ein homogener und reproduzierbarer Auftrag der Schichtdicke möglich.

Wie Tabelle 5.2 darstellt, unterscheiden sich dabei die gemessenen thermischen Widerstände sowohl der Leiterplatte der drei Verbindungen als auch des Kühlkörpers. Bei einer mittleren Zunahme der Kontaktfläche der unlösbaren stoffschlüssigen Verbindungen um 52,4% gegenüber der lösbaren kraftschlüssigen Verbindung liegt der Abfall des thermischen Widerstands der Leiterplatte bei ca. 10% und des Kühlkörpers bei ca. 1%.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das thermische Transientenverfahren zur Charakterisierung von Halbleiter-Systemen einen Einblick in die System-Struktur bezüglich der verschiedenen internen Wärmewiderstände und der thermischen Kapazitäten gibt, wobei eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse gewährleistet ist. Dabei können für den individuellen Anwendungsfall Aussagen über die Temperaturänderung im System anhand der Strukturfunktionen getroffen werden. Als Abweichung von der Strukturfunktion eines bekannten, guten Systems bieten sie Informationen über mögliche strukturelle Defekte wie Hohlräume an thermischen Schnittstellen. Dabei können Hinweise auf das Vorhandensein von thermischen Kontaktwiderständen entnommen und das Verbesserungspotenzial aufgezeichnet werden.

Kapitel 6

VALIDIERUNG DER ENTWICKLUNGSSYSTEMATIK

In diesem Kapitel wird demonstriert, wie die Entwicklungssystematik in der Anwendung funktioniert und welches die wesentlichen Ergebnisse sind. Der hohe Detailgrad der einzelnen Phasen des V-Modells bei der thermischen Dimensionierung qualitativ hochwertiger LED-Systeme wirft die Frage auf, ob es auch für kleinere Projekte geeignet ist. Aus diesem Grund wird die im vorgehenden Kapiteln vorgestellte Entwicklungssystematik der thermischen Dimensionierung qualitativ hochwertiger LED-Systeme anhand zweier Beispiele validiert. Beim ersten Anwendungsbeispiel handelt es sich um die Entwicklung einer energieeffizienten Tischbeleuchtung, bei der das Thermomanagement in das ästhetische Leuchtendesign integriert ist. Dies ist der Gegenstand von Abschnitt 6.1. Die Entwicklung einer Straßenleuchte, bei der Kühlkörper gleichzeitig als optisches Element fungiert, wird in Abschnitt 6.2 betrachtet. Abschnitt 6.3 bewertet auf Basis der Anwendungsbeispiele die erarbeitete Entwicklungssystematik anhand der Anforderungen aus Abschnitt 3.1.

6.1 ANWENDUNGSBEISPIEL: TISCHLEUCHTE

Die Leuchte NOAM wurde im Rahmen des Forschungsverbundes „Zentrum für angewandte Forschung an Hochschulen“ ZAFH im Rahmen des Projekts LED OASYS entwickelt und in Form eines Prototypen der Öffentlichkeit vorgestellt [83]. Hierbei handelt es sich um eine energieeffiziente Tischbeleuchtung, bei der das Thermomanagement in das ästhetische Leuchtdesign integriert ist. Ein Ziel der Gestaltung ist es, einen möglichst stufenlosen Übergang zwischen Anschlusskabel, Leuchtkörper und Optik zu verwirklichen. Die geschwungene Form des Kühlkörpers, der gleichzeitig als Gehäuse fungiert, orientiert sich an der filigranen Ästhetik eines üblichen Stromkabels (Abbildung 6.1 links). Eine weitere Besonderheit der Leuchte besteht in der räumlichen Trennung der Lichterzeugung und der Lichtauskopplung, um das entsprechende Innovationspotenzial von LED-Beleuchtung darzustellen.

Ausgehend von den zuvor ermittelten Anforderungen wurde während des Systementwurfs eine lösungsneutrale funktionale Systembeschreibung in Form einer Funktionshierarchie aufgestellt. Abbildung 6.1 rechts veranschaulicht die vorgenommenen Aufteilung der räumlich getrennten Funktionsmodule. Der Entwicklungsprozess des Thermomanagements wurde einschließlich der Fertigung eines Prototyps sowie dessen thermische Vermessung und Analyse erfolgreich abgeschlossen und wird daher im Folgenden als beispielhafte Validierung der Entwicklungssystematik vorgestellt. Die Entwicklung der Funktionsmodule der Optik und der Elektronik wurde im Rahmen zweier Partnerarbeiten des ZAFH-Projektes ausgelegt [35, 83].

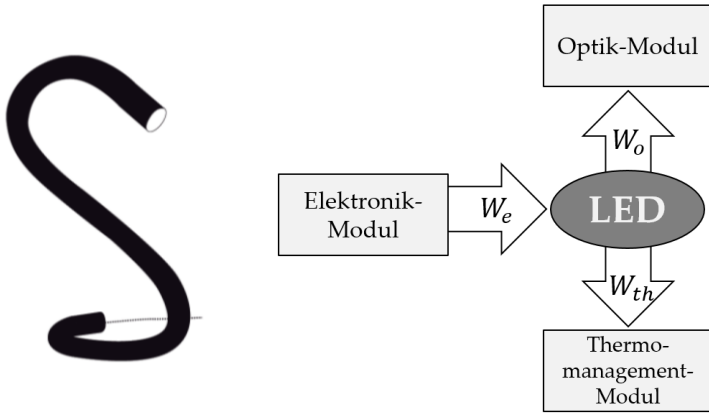


Abbildung 6.1: Darstellungen der Leuchte NOAM: Piktogramm (links) und Lösungsneutrale funktionale Systembeschreibung (rechts)

6.1.1 PHASE1: DESIGN

RANDBEDINGUNGEN UND ZIELPARAMETER

Die Randbedingungen für das thermische Design sind im Wesentlichen durch Einsatz einer Einzel-Chip LED vom Typ Cree X-Lamp XP-G2 R4 [84], die Geometrie des gebogenen Lichtleiters mit $D_a = 20$ mm Außendurchmesser als Optik und den reinen Inneneinsatz der Leuchte mit den Umgebungstemperaturen von $+10$ °C bis $+30$ °C vorgegeben. Die angestrebte Geometrie des Kühlkörpers ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Der thermische Widerstand zwischen der aktiven Zone der LED und

dem thermischen Anschlusspad wird vom Hersteller mit 4 K/W angegeben. Die zum Lichtleiter zentrierte LED wird dabei in einer vertikalen Ebene ohne Verkipfung auf dem Kühlkörper positioniert. Aus Gründen des Designs- und der Herstellungsmöglichkeiten wird der Kühlkörper aus Aluminium gefertigt. Außerdem befinden sich die elektrischen Vorschaltgeräte außerhalb des Kühlkörpers, sodass diese bei der Auslegung des Thermomanagements nicht weiter berücksichtigt werden müssen.

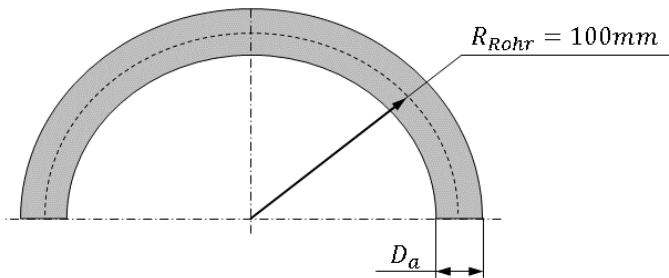


Abbildung 6.2: Angestrebte Kühlkörpergeometrie der Leuchte NOAM

Die Aufgabe ist es zunächst, die in Wärme umgesetzte Verlustleistung so gut abzutransportieren, dass an der aktiven Zone der LED eine möglichst geringe Temperatur herrscht, die $T_{J\max} = 125\text{ °C}$ nicht übersteigt. Hierbei wird in erster Linie eine kompakte, robuste und möglichst kostengünstige Lösung für ein effizientes Thermomanagement angestrebt. Die Verlustleistung ergibt sich beim Betrieb der Leuchtdiode mit einer Stromstärke von 1500 mA. Die Maximaltemperatur für die aktive Zone der X-Lamp XP-G2 ist hier mit 125 °C definiert, damit der Lichtstromrückgang gegenüber 25 °C von mindestens 80% gewährleistet wird [84].

Grundsätzlich stellen zugängliche Oberflächen, die bei ihrer Verwendung heiß werden, ein Verbrennungsrisiko dar. Damit der Benutzer die Möglichkeit hat, die Leuchte am Kühlkörper zur Ausrichtung anzufassen, wird nun die Temperaturgrenze von heißen Kühlkörperoberflächen zum Schutz gegen Hautverbrennungen festgelegt. Tabelle 6.1 zeigt die Verbrennungsschwellen beim beabsichtigten Berühren heißer Oberflächen für verschiedene Materialien in Abhängigkeit der Kontaktdauer an [85]. Die Verbrennungsschwelle ist die Oberflächentemperatur, die die Grenze zwischen keiner Verbrennung und einer Verbrennung ersten Grades darstellt, verursacht durch den Kontakt der Haut mit dieser Oberfläche bei einer bestimmten Kontaktdauer. Dabei handelt es sich um einen Auszug aus der Norm DIN EN 563. Die Messeinrichtung und Vorgehensweise beim Messen der Oberflächentemperatur des Materials erfolgte dabei nach DIN EN ISO 13732-1 mit elektrischem Thermometer mit Kontaktfühler aus Metall. Die maximale Messabweichung lag dabei bei $\pm 2\text{K}$ für eine Oberflächentemperatur größer als $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [85].

Tabelle 6.1: Verbrennungsschwellen bei Berührung heißer Oberflächen verschiedener Materialien [85]

Material	Max. Oberflächentemperatur bei Kontaktdauer bis zu [$^{\circ}\text{C}$]			
	1 s	1 min	10 min	8 Std.
Unbeschichtete Metalle	65-70	51	48	43
Beschichtete Metalle (Schichtdicke $50\mu\text{m}$)	75-80	51	48	43
Keramik, Glas, Stein	80-86	56	48	43
Kunststoffe	86-93	60	48	43
Holz	110-140	60	48	43

Da beim Berühren der Leuchte am Kühlkörper zur Ausrichtung mit einer Kontaktzeit von 10 s bis zu 1 min zu rechnen ist, soll die Oberflächentemperatur des Aluminium-Kühlkörpers unterhalb 51 °C liegen. Da die Temperatur des Kühlkörpers nicht einheitlich ist, wird in diesem Zusammenhang von einer mittleren Oberflächentemperatur des Kühlkörpers gesprochen. Dabei soll die maximale Oberflächentemperatur des Kühlkörpers möglichst nahe bei 51 °C liegen und darf 65 °C nicht übersteigen.

KONZEPTUELLE AUSLEGUNG

Der Inneneinsatz im Wohnraum bedingt ein passiv luftgeköhltes System, um Geräusche während des Betriebs zu vermeiden. Mit der abführbaren Verlustleistung $P_{th} = 4,7 \text{ W}$ ergibt sich der maximal zulässige thermische Gesamtwiderstand aus Gleichung (4.1)

$$\begin{aligned} R_{th\ JU\ max} &= \frac{T_{J\ max} - T_U}{P_{th}} = \frac{125^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}}{4,7\ \text{W}} = \\ &= 20,2\ \text{K/W}. \end{aligned} \quad (6.1)$$

Für die Wärmeübertragung der Leuchte NOAM lässt sich ein in Abbildung 6.3 dargestelltes Ersatzmodell aufstellen. Ausgehend von der aktiven Zone der LED bewegt sich die Wärme dabei zuerst zur Lötstelle ($R_{th\ JB}$), dann von der Lötstelle zur Platine ($R_{th\ BP}$), von dort über den Kühlkörper ($R_{th\ PK}$) an den Lichtleiter ($R_{th\ KO}$) und von Kühlkörper- und Lichtleiteroberfläche anschließend an die Umgebung ($R_{th\ KU}$ und $R_{th\ OU}$).

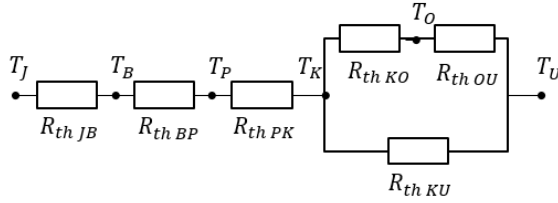


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung des Wärme-
flusses in der Leuchte NOAM in Form eines Ersatzschalt-
bildes

Da der Lichtleiter aus Polymethylmethacrylat (PMMA) hergestellt ist, der im Vergleich zum Kühlkörper eine sehr geringere Wärmeleitfähigkeit von 0,19 W/mK aufweist, leistet die Wärmeleitung $R_{th OU}$ über den Lichtleiterstab keinen nennenswerten Anteil am Wärmetransport an die Umgebung. Folglich können in der Parallelschaltung die thermischen Widerstände $R_{th KO}$ und $R_{th OU}$ gegenüber $R_{th KU}$ vernachlässigt werden. Mit diesen Vereinfachungen ergibt sich der thermische Gesamtwiderstand zu:

$$R_{th JU} = R_{th JB} + R_{th BP} + R_{th PK} + R_{th KU} \quad (6.2)$$

Auf Basis des vorgestellten Ersatzschaltbildes und des berechneten maximal zulässigen thermischen Gesamtwiderstandes findet im Prozessschritt Initialentwurf der konkrete Entwurf einzelner Systemkomponenten statt.

INITIALENTWURF

Während der thermische Widerstand der LED $R_{th JB}$ nur vom Hersteller beeinflusst und somit reduziert werden kann, wird die Wärmeleitung von der LED-Lötstelle zur Applikationsumgebung durch geeignete Auslegung der entsprechenden Komponenten des thermischen Pfades beeinflusst. Dabei wird durch ein spezielles Leiterplattenlayout die Wärme frühzeitig in der Leiterplatte gespreizt, um lokale Hot-Spots zu vermeiden. Aufgrund des Gesamtleistungseintrags der Lichtquelle und des geringen Platzbedarfs der Leiterplatte im Bauraum des Kühlkörpers wird eine Metallkern-Platine als Schaltungsträger verwendet.

Eine weitere Möglichkeit besteht hier im Einsatz eines glasfaserverstärkten Basismaterials auf Epoxidharzbasis (FR4) mit thermischen Durchkontaktierungen. Da ein Via alleine nicht sehr viel Wärme leiten kann, sollen mehrere Vias eng aneinander platziert werden. Außerdem sollen die Durchgangslöcher zur weiteren Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit möglichst nahe an der Wärmesenke der LED liegen. Somit ist die optimale Auslegung eines Vias-Konzeptes aus technischer Sicht immer eine maßgeschneiderte Lösung und hängt stark von der LED und dem zu Verfügung stehenden Platz ab. Zwar stellt der Einsatz einer FR4-Platine mit thermischen Vias für die Serienproduktion eine kostengünstigere Lösung dar, dennoch ist ihr Einsatz für den Prototypbau nur aufwendig umsetzbar.

Aufgrund dessen wird im Rahmen dieser Arbeit eine bereits auf dem Markt erhältliche Metallkern-Platine für die Realisierung des ersten Prototyps gewählt, obwohl für die betrachtete LED-Leuchte die Möglichkeit der Wärmeabfuhr mit einer FR4-Platine mit thermischen Vias genauso

gut geeignet ist. Bei der Auswahl einer passenden Metallkern-Leiterplatte wird darauf geachtet, dass die Isolationsschicht einen möglichst geringen thermischen Widerstand hat, dass eine gute Anbindung von der Layout-Lage an den Metallträger vorhanden ist. Ein essenzielles Auswahlkriterium ist dabei die Anbindungsfläche zum Kühlkörper, dessen Material und Geometrie durch die Anforderungen der Gestaltung bereits festgelegt sind. Um einen möglichst geringen thermischen Widerstand für die Leiterplatte zu erzielen, ist nach Gleichung (2.8) eine möglichst große Querschnittfläche A_{platte} erforderlich. Zur Festlegung der maximal zulässigen Abmaße für die Metallkern-Platine wird im Folgenden der Kühlkörper näher betrachtet.

Um die Anforderung der Gestaltung nach einem stufenfreien Übergang zwischen dem Kühlkörper und der Optik zu erfüllen, wird hier ein gebogenes Aluminium-Rundrohr mit dem Außendurchmesser von $D_a = 20$ mm als Kühlkörper verwendet. Dabei wird eine formschlüssige Verbindung zwischen beiden Funktionsmodulen durch die Verkleinerung des Durchmessers am Ende des Lichtleiters realisiert.

Der Wärmedurchgangswiderstand des Kühlkörpers setzt sich hierbei additiv aus den Einzelwiderständen des Wärmeübergangs und der Wärmeleitung zusammen. Da die Wärme zuerst im Aluminium-Rundrohr durch Wärmeleitung effektiv vom Fuß zur Spitze transportiert werden muss, wie Abbildung 6.4 darstellt, spielt die Größe des wärmeleitenden Querschnittes eine wichtige Rolle.

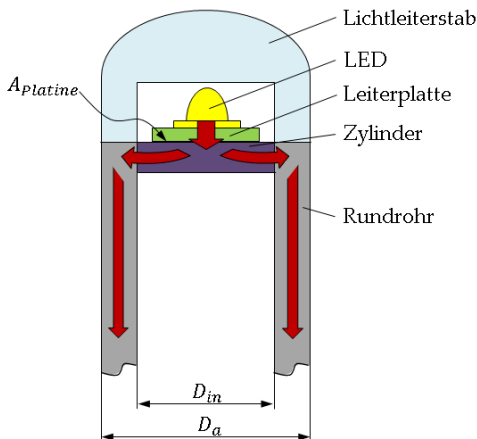


Abbildung 6.4: Schematische Darstellung der Wärmeleitung in der Leuchte NOAM. Der thermische Widerstand der Wärmeleitung im Aluminium-Rundrohr setzt sich aus den sequenziell geschalteten Einzelwiderständen des Zylinders (in violett), der für die Verbindung der bestückten Leiterplatte mit dem Rundrohr zuständig ist, und des Rundrohrs (in grau).

Bei der reinen Wärmeleitung stellt sich ein Temperaturgradient gemäß der Grundgleichung (2.5) ein. Erfolgt jedoch neben der Wärmeleitung entlang des Aluminium-Rundrohrs gleichzeitig noch ein Wärmeübergang an seiner Oberfläche, verändert sich der Temperaturverlauf vom Fuß bis zur Spitze des Rundrohrs wesentlich. Aufgrund dessen wird für das Festlegen der optimale Wanddicke des Aluminium-Rundrohrs vom Fall der Wärmeleitung bei gleichzeitiger Konvektion an der Rundrohr-Oberfläche ausgegangen. Die folgenden Überlegungen beziehen sich unter anderem auf die Wirksamkeitsbestimmung des Temperaturprofils auf

die Wärmetransportvorgänge in dem daraus resultierenden Rundrohr mit dem Außendurchmesser von $D_a = 0,02 \text{ m}$ mithilfe des Rippenwirkungsgrades η_R gemäß Gleichung (4.5). Da es sich dabei um ein geschlossenes Rundrohr handelt, wird im Folgenden lediglich der Wärmeübergang an seiner äußeren Oberfläche betrachtet. Der äußere Rohrumfang berechnet sich hierbei zu

$$U = \pi \cdot D_a = 0,06 \text{ m}. \quad (6.3)$$

Die wärmeleitende Fläche A_{Rohr} lässt sich in Abhängigkeit vom Innendurchmesser des Rundrohrs D_{in} wie folgt bestimmen:

$$A_{Rohr} = \frac{\pi \cdot (D_a^2 - D_{in}^2)}{4} \quad (6.4)$$

Da es sich hier um ein sehr dünnwandiges langes Rohr handelt ($L \gg A/U$), entspricht die Rippenhöhe L_s nach Gleichung (4.6) der Länge des Aluminium-Rundrohrs L und berechnet sich mit dem Biegeradius des Rundrohrs $R_{Rohr} = 0,1 \text{ m}$ zu

$$L_s = L = \pi \cdot R_{Rohr} = 0,31 \text{ m}. \quad (6.5)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient bei der freien Konvektion am Rundrohr mit dem Außendurchmesser $D_a = 0,02 \text{ m}$ berechnet sich mit Gebrauchsgleichung (6.6) [17] zu $5,62 \text{ W/m}^2\text{K}$. Da die mittlere Oberflächentemperatur des Aluminium-Kühlkörpers 51°C nicht übersteigen soll, ergibt sich bei der maximal zulässigen Umgebungstemperatur eine Temperaturdifferenz zwischen Kühlkörper T_K und Umgebung T_U ca. 20 K .

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{T_K - T_U}{D_a}} \quad (6.6)$$

Tabelle 6.2: Abhängigkeit des Rippenwirkungsgrades von der Wandstärke eines Aluminium-Rundrohrs mit dem Außendurchmesser von 20 mm

Wand- dicke w [10^{-3} m]	Wärmeleit. Fläche A_{Rohr} [10^{-6} m ²]	Rippenwir- kungsgrad η_R [%]	Relative Änderung der wärmeleit. Fläche [%]	Relative Änderung des Rippenwirkungs- grades [%]
0,5	30,6	45,4	-	-
1	59,7	59,3	95,1	30,6
1,5	87,2	67,2	46,1	13,3
2	113,1	72,2	29,7	7,4
2,5	137,5	75,7	21,6	4,9
3	160,2	78,2	16,5	3,3
3,5	181,4	80,3	13,2	2,7
4	201,1	81,7	10,9	1,7

Tabelle 6.2 zeigt, wie sich der Wirkungsgrad des Aluminium-Rundrohrs mit einer Wärmeleitfähigkeit von 230 W/mK in Abhängigkeit von der Wanddicke w nach Gleichung (4.5) verändert, wobei für die Wanddicke

$$w = \frac{D_a - D_{in}}{2} \quad (6.7)$$

gilt. Der Grund dafür liegt im Temperaturgefälle zwischen Rippenfuß und Rippenspitze. Je größer der innere Durchmesser des Aluminium-

Rundrohrs und somit kleiner die Wandstärke ist, desto kleiner ist seine wärmeleitende Querschnittfläche. Dadurch wird weniger Wärme im Aluminium-Rundrohr durch Wärmeleitung vom Fuß zur Spitze transportiert. Dies verursacht eine deutlich niedrigere Oberflächentemperatur an der Rohrspitze, sodass die Wärme nicht effizient über die ganze äußere Rohroberfläche in die umströmende Luft übertragen wird.

Zudem gibt Tabelle 6.2 Aufschluss über die relative Änderung $\Delta y/y$ der wärmeleitenden Fläche und des resultierenden Rippenwirkungsgrades. Die relative Änderung des aktuellen Wertes y_i , bezogen auf den alten Wert y_{i-1} , wird wie folgt berechnet.

$$\frac{\Delta y}{y} = \left| \frac{y_i - y_{i-1}}{y_{i-1}} \right| \quad (6.8)$$

Aufgrund der entlang der Oberfläche veränderlichen Temperaturdifferenz zur Umgebung und bedingt durch die Wärmeleitung vom Fuß zur Spitze verändert sich auch die konvektive Wärmeübertragung an die Umgebung. Dies verursacht eine nicht lineare Änderung des Rippenwirkungsgrades mit der wärmeleitenden Fläche. Aus der Tabelle geht hervor, dass eine Vergrößerung der wärmeleitenden Fläche von 21,6% bei einer Änderung der Wandstärke von 2 mm auf 2,5 mm eine geringfügige Änderung des Rippenwirkungsgrades von 4,9% hervorruft. Mit einer weiteren Zunahme der Wandstärke verbessert sich zwar die Wärmeleitung entlang des Aluminium-Rundrohrs, dabei nimmt jedoch der innere Rohrdurchmesser ab. Dies führt zur Reduzierung der maximal zulässigen Abmaße für die Metallkern-Platine.

Tabelle 6.3: Abhängigkeit des Wärmeleitungswiderstandes einer Isolationsschicht mit der Dicke von 1 mm und der Wärmeleitfähigkeit von 1,3 W/mK von der Wandstärke eines Aluminium-Rundrohrs mit dem Außendurchmesser von 20 mm

Wanddicke w [10^{-3} m]	Wärmeleitende Fläche A_{Platine} [10^{-6} m ²]	Thermischer Widerstand der Isolationsschicht [K/W]
0,5	283,5	2,7
1	254,5	3,0
1,5	227,0	3,4
2	201,1	3,8
2,5	176,7	4,4
3	153,9	5,0
3,5	132,7	5,8
4	113,1	6,8

Der thermische Gesamtwiderstand der Metallkern-Leiterplatine, der sich aus der Summe der thermischen Widerstände der Einzelschichten gemäß Gleichung (2.9) setzt, ist in erster Linie vom thermischen Widerstand der Isolationsschicht abhängig. Tabelle 6.3 zeigt, wie sich der Wärmeleitungswiderstand einer beispielhaften Isolationsschicht der Dicke 1 mm und der Wärmeleitfähigkeit 1,3 W/mK in Abhängigkeit von der Wanddicke ändert. Eine sich dabei ergebende Abnahme der wärmeleitenden Fläche A_{Platine} bewirkt eine Vergrößerung des betrachtenden Einzelwiderstandes. Es lässt sich erkennen, dass eine Verdopplung der Fläche von $132,7 \cdot 10^{-6}$ m² auf $283,5 \cdot 10^{-6}$ m² eine Halbierung des thermischen Widerstands hervorruft. Aus diesem Grund und den Ergebnissen der Tabelle

6.2 wird hier der maximal zulässige Durchmesser der Metallkern-Platine auf 16 mm begrenzt.

Eine runde Metallkern-Platine mit 14 mm Durchmesser, die in Abbildung 6.5 zu sehen ist, erfüllt am besten die an die Leiterplatte gestellten Anforderungen. Tabelle 6.4 fasst die wichtigsten technischen Daten dieser Platine zusammen.



Abbildung 6.5: Ausgewählte Metallkern-Platine mit 12 mm Außendurchmesser [86]

Tabelle 6.4: Technische Daten der verwendeten Metallkern-Platine mit 12mm Durchmesser [86]

Schicht	Dicke [μm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Layoutlage	35	390
Isolationslage	70	1,3
Metallträger	1000	230

Wie in Abschnitt 4.1.3 erwähnt, kann die Zuverlässigkeit und somit die Lebensdauer der LED-Systeme in der Design-Phase durch die Verbindungstechnik entscheidend beeinflusst werden. Aus diesem Grund werden im Weiteren die geeigneten Verbindungstechniken zwischen einzelnen Systemelementen festgelegt. Aufgrund des Gesamtleistungseintrags der Lichtquelle und ihrer Größe von wenigen Quadratmillimetern erfolgt die LED-Anbindung an den Schaltungsträger mittels Lotverfahren. Der

bestückte Schaltungsträger kann dabei direkt auf dem Kühlkörper durch eine Schraub-, Klemm- oder Klebverbindung angebracht werden. Der Einfluss dieser Verbindungen auf die Wärmeübertragung im erarbeiteten System der Leuchte NOAM wird im Folgenden mit Hilfe von thermischen Simulationen betrachtet. Die Verbindung zwischen dem Kühlkörper und dem Plexiglasstab soll kraftschlüssig (lösbar) realisiert werden, um eine vertikale (senkrecht zur Tischoberfläche stehende) Position des Lichtleiters gewährleisten und bei Bedarf diesen durch einen anderen austauschen zu können.

OPTIMIERUNG DES THERMISCHEN VERHALTENS

Mit Hilfe von thermischen Simulationen werden nun die thermischen Vorgänge im entwickelten System veranschaulicht. Dafür wird das oben beschriebene thermische Modell der Leuchte NOAM mit der entsprechenden PMMA-Optik dreidimensional aufgebaut. Anschließend werden für jede Komponente des Modells Materialien und Oberflächen definiert und damit deren thermische Eigenschaften vorgegeben. Die thermische Anbindung der LED findet hier zuerst optimal ohne zusätzlichen thermischen Widerstand statt. Für die Durchführung der thermischen Simulationen steht die der in CAD integrierten Software SOLIDWORKS Flow Simulation zur Verfügung. Abbildung 6.6 zeigt das Simulationsmodell der Leuchte NOAM (vgl. Abbildung 6.4).

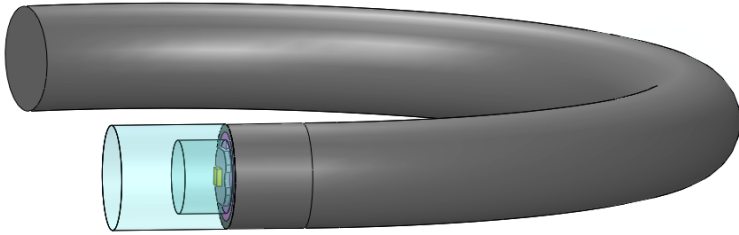


Abbildung 6.6: Simulationsmodell der Leuchte NOAM, das aus einer Einzel-Chip LED vom Typ Cree X-Lamp XP-G2 R4 als Wärmequelle, der festgelegten Metallkern-Platine mit 14 mm Durchmesser, einem gebogenen Aluminium-Rundrohr als Kühlkörper und einem Lichtleiter als Optik besteht.

Auf Basis des erstellten Finite-Elemente-Modells wird als Nächstes eine Parameteroptimierung durchgeführt, um wichtige Erkenntnisse über die Vor- und Nachteile bestimmter Konstruktionsmerkmale zu erhalten und somit das thermische Verhalten der Leuchte NOAM zu verbessern. Die Wärmeübertragung über den Kühlkörper wird dabei durch vier Parameter beschrieben. Diese sind:

- die Wanddicke des Aluminium-Rundrohrs w ,
- die Dicke des Zylinders d , der für die Verbindung der bestückten Leiterplatte mit dem gebogenen Rundrohr zuständig ist,
- der Emissionskoeffizient der Kühlkörperoberfläche ε und
- der thermische Kontaktwiderstand zwischen der Leiterplatte und dem Kühlkörper.

Damit der Einfluss der einzelnen Parameter getrennt voneinander untersucht werden kann, wird in jeder Simulationsreihe mit den Eigenschaften vom Aluminium-Rundrohr begonnen und lediglich ein Parameter verändert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der vier Variantenstudien vorgestellt. Wenn es nicht anders vermerkt ist, wird der Parameterwert mit dem besten Ergebnis für den weiteren Verlauf der Variantenstudie übernommen.

Da die im vorherigen Unterabschnitt (s. S. 150) erläuterte Rechenmethode des Einflusses der Wanddicke auf die Wärmetransportvorgänge im Aluminium-Rundrohr nur eine Näherung ist, kann sie für genaue Berechnungen die Simulationen der thermischen Vorgängen im System nicht ersetzen. Tabelle 6.5 zeigt den Einfluss der Wanddicke des gebogenen Aluminium-Rundrohrs mit dem Außendurchmesser von 20 mm auf die Temperatur der aktiven Zone der LED und der Kühlkörperoberfläche. Dafür sind thermische Simulationen mit der Verlustleistung von $P_{th} = 3,8 \text{ W}$ und einer höchst zulässigen Umgebungstemperatur von 30 °C durchgeführt. Diese Verlustleistung ergibt sich nach Gleichung (2.24), wobei ein optischer Wirkungsgrad der LED von 20% berücksichtigt wird.

Der Wärmetransport findet hier zunächst lediglich über die Wärmeleitung und die Konvektion statt (keine Wärmestrahlung). Während die durchgeführten thermischen Simulationen neben der maximalen Chip-temperatur der LED auch die maximale und minimale Oberflächentemperatur an der Außenseite des Aluminiumrohrs lieferten, berechnet sich der thermische Gesamtwiderstand gemäß Gleichung (4.1).

Tabelle 6.5: Abhängigkeit der Chiptemperatur der LED und der Oberflächentemperatur des Kühlkörpers von der Wanddicke des Aluminium-Rundrohrs ($P_{th}=3,8\text{ W}$, $T_U=30^\circ\text{C}$)

Wand- dicke [mm]	Max. Chip- temperatur [°C]	Oberflächentemperatur am Kühlkörper [°C]		Thermischer Gesamtwider- stand [K/W]
		max.	min.	
1	99,8	68,1	43,2	18,4
1,5	98,7	65,5	46,8	18,1
2	96,7	63,5	48,4	17,6
2,5	96,2	62,9	49,7	17,4
3	96,9	63,5	50,4	17,6
3,5	96,6	63,4	52,6	17,5

Wie aus Tabelle 6.5 hervorgeht, verhindert eine kleine wärmeleitende Fläche, die sich bei der Reduzierung der Wandstärke ergibt, die Wärmeleitung im Rundrohr. Der daraus resultierende geringere Wärmestrom hat einen größeren Temperaturgradienten entlang des Rundrohrs zur Folge. Dies beeinflusst negativ den Wärmeübergang von der äußeren Rohroberfläche in die umströmende Luft, wodurch letztendlich die Chiptemperatur der LED und somit der thermische Gesamtwiderstand des Systems steigen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein dünnwandiges Aluminium-Rundrohr als Kühlkörper der Leuchte NOAM nicht so wirksam wie ein dickwandiges Rundrohr ist, denn es bietet dem Wärmeübergang an die Umgebung eine kleinere Temperaturdifferenz. Allerdings liegt das beste Ergebnis für die Chiptemperatur der LED bei einer Wanddicke von 2,5 mm. Die Ursache liegt darin, dass

durch die Verlustleistung der LED eine zusätzliche Erwärmung im Inneren des geschlossenen Aluminium-Rundrohrs hervorgerufen wird. Bei kleineren Wanddicken (bis 2,5 mm) ist aufgrund des daraus resultierenden größeren Innenraum und der geringeren Oberflächentemperatur des Kühlkörpers dieser Effekt vernachlässigbar klein. Eine weitere Vergrößerung der Wanddicke erzeugt zwar einen verkleinerten Temperaturgradienten entlang des Rundrohrs, führt jedoch zu einer Verkleinerung des Rohrrinnenraums. Dadurch wird die Wärmeabführung durch den Kühlkörper an die Umgebung weder begünstigt noch verschlechtert.

Als Nächstes wird die Dicke des Zylinders, der für die Verbindung der bestückten Leiterplatte mit dem gebogenen Rundrohr zuständig ist, auf die Wärmeleitung im LED-System der Leuchte NOAM untersucht. Der Durchmesser des Zylinders ergibt sich aus dem inneren Durchmesser des Rundrohrs und berechnet sich mit dem Außendurchmesser des Aluminium-Rundrohrs von $D_a=20$ mm und der Wandstärke von 2,5 mm zu 15 mm. Tabelle 6.6 zeigt den Einfluss der Dicke d dieses Zylinders auf die Temperatur der aktiven Zone der LED und der Kühlkörperoberfläche.

Wie daraus hervorgeht, hat die Zylinderdicke einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf den Wärmetransport im System. Während sich bei einer dreifachen Vergrößerung der Zylinderdicke von 5 mm auf 15 mm eine maximale Abnahme der Chiptemperatur um ca. 1 °C ergibt, ändert sich die durchschnittliche Oberflächentemperatur des Kühlkörpers nur wenig. Der Grund hierfür liegt darin, dass wegen einer hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium bereits eine sehr gute radiale Wärmespreizung im Zylinder erreicht wird, wodurch die Wärme effektiv zum Kühlkörper geleitet wird. Mit zunehmender Dicke vergrößert sich neben der

wärmeleitenden Fläche zwischen dem Zylinder und dem Kühlkörper auch der thermische Widerstand der linearen Wärmeleitung im Zylinder. Die Überlagerung der beiden Effekte führt dazu, dass mit zunehmenden Zylinderdicken der verbesserte Wärmetransport zum Kühlkörper durch die Steigerung des thermischen Leitungswiderstandes im Zylinder wieder aufgehoben wird.

Tabelle 6.6: Abhängigkeit der Chiptemperatur der LED und der Oberflächentemperatur des Kühlkörpers von der Zylinderdicke des Aluminium-Rundrohr ($P_{th}=3,8W$, $T_U=30^{\circ}C$)

Zylinder- dicke [mm]	Max. Chip- temperatur [°C]	Oberflächentemperatur am Kühlkörper [°C]	
		max.	min.
5	96,2	62,9	49,7
7,5	95,9	62,7	49,6
10	95,8	63,8	49,9
12,5	95,3	63,3	49,7
15	95,1	63,1	49,6

Aus Tabelle 6.5 und Tabelle 6.6 geht außerdem hervor, dass obwohl die maximale Chiptemperatur der LED wie gewünscht $125^{\circ}C$ nicht überschreitet, liegt die zu erwartete maximale Temperatur der Kühlkörperoberfläche deutlich oberhalb des entsprechenden Zielwertes von $51^{\circ}C$ mit der maximalen Messabweichung $\pm 2K$. Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt untersucht, inwiefern eine Änderung des Emissionskoeffizienten der Kühlkörperoberfläche ε zur Optimierung des Systems

eingesetzt werden kann. Beim festgelegten Material kann der Emissionskoeffizient einer Oberfläche durch ihre Beschaffenheit verändert werden.

In Tabelle 6.7 sind die Auswirkung und die daraus folgende Möglichkeit des Verstärkens oder Verringerens der Wärmestrahlung des zu untersuchenden Aluminium-Rundrohrs gezeigt. Dabei werden typische Werte des Emissionskoeffizienten für eine Aluminium-Oberfläche im polierten ($\epsilon=0,04$), unbehandelten ($\epsilon=0,68$), angerauten (0,83) und lackierten Zustand ($\epsilon=0,95$) betrachtet (s. Tabelle 2.2).

Tabelle 6.7: Abhängigkeit der Chiptemperatur der LED und der Oberflächentemperatur des Kühlkörpers vom Emissionskoeffizienten von Aluminium mit verschiedenen Oberflächen ($P_{th}=3,8\text{ W}$, $T_U=30^\circ\text{C}$)

Emissionskoeffizient der Kühlkörper-Oberfläche	Max. Chiptemperatur $[\text{°C}]$	Oberflächentemperatur am Kühlkörper $[\text{°C}]$		Thermischer Gesamtwiderstand $[\text{K/W}]$
		max.	mittel.	
0,04	94,4	62,4	55,4	17,0
0,68	86,6	54,4	47,9	14,9
0,83	85,5	53,3	46,8	14,6
0,95	85,6	52,6	45,9	14,6

Die durchgeführten thermischen Simulationen ($P_{th}=3,8\text{W}$, $T_U=30^\circ\text{C}$, $w=2,5\text{mm}$, $d=7,5\text{ mm}$) zeigten, dass die gewünschte mittlere Oberflächentemperatur am Kühlkörper von 51°C höchstens erst bei einem Emissionskoeffizienten der Kühlkörperoberfläche von $\epsilon=0,68$ erreicht

wird. Dieses Emissionsverhältnis weist eine angeraute Aluminiumoberfläche auf. Die dabei zu erwartende Temperaturverteilung im Simulationsmodell ist in Abbildung 6.7 (oben) gezeigt.

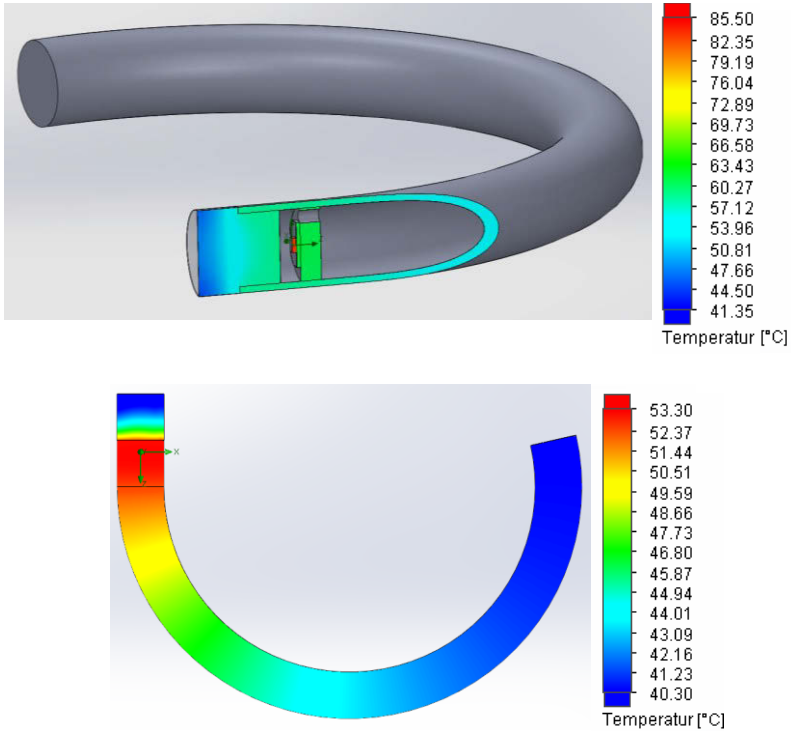


Abbildung 6.7: Grafische Darstellung der Simulationsergebnisse der Leuchte NOAM ($P_{th}=3,8\text{ W}$, $T_U=30^\circ\text{C}$): Festkörpertemperatur in der Querschnitt-Darstellung (oben) und Oberflächentemperatur (unten)

Die thermische Anbindung der LED erfolgt hier über einen zusätzlichen thermischen Widerstand des Lotes mit einer typischen Schichtdicke von ca. 70 μm und einer Wärmeleitfähigkeit von 60 W/mK. In diesem Worst-Case Szenario lässt sich eine Temperatur am LED-Chip der Leuchte NOAM von $T_j=85,5\text{ }^\circ\text{C}$ erwarten. Diese liegen deutlich unterhalb des definierten Maximalwerts von 125 $^\circ\text{C}$. Die Grafik in Abbildung 6.7 (unten) stellt die simulierte Temperaturverteilung an der Oberfläche des Kühlkörpers dar. Wie daraus hervorgeht, ist eine maximale Oberflächentemperatur des Kühlkörpers von 53,3 $^\circ\text{C}$ zu erwarten. Diese liegt nun geringfügig oberhalb der definierten Verbrennungsschwelle von 51 $^\circ\text{C}$.

Anschließend wird der Einfluss der möglichen Verbindungen zwischen dem bestückten Schaltungsträger und dem Kühlkörper auf die Wärmeübertragung untersucht. Hierzu wird das erarbeitete thermische Modell des Prototyps der Leuchte NOAM um eine zusätzliche thermische Schicht erweitert. Damit wird untersucht, wie der Einsatz der Wärmeleitpaste und des Wärmeleitklebers den Wärmetransport im System im Vergleich zum reinen metallischen Kontakt der Schraubenverbindung mit zwei M3-Schrauben beeinflusst. Da die Hauptaufgabe der Wärmeleitpaste lediglich im Auffüllen der Rautiefen besteht, wird für die modellierte Schicht der Wärmeleitpaste eine typische Dicke von 50 μm und einer Wärmeleitfähigkeit von 10 W/mK eingegeben. Der Einfluss der Wärmeleitkleber-Schicht wird durch die Angabe einer typischen Dicke von 1 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von 7,5 W/mK simuliert.

Tabelle 6.8 fasst die einzelnen Simulationsergebnisse ($P_{th}=3,8^\circ\text{W}$, $T_U=30\text{ }^\circ\text{C}$, $w=2,5\text{ mm}$, $d=7,5\text{ mm}$) zusammen. Wie daraus hervorgeht, sind bei den betrachteten Verbindungen des Schaltungsträgers mit dem

Kühlkörper keine Unterschiede der Oberflächentemperatur des Kühlkörpers zu erwarten, während sich dabei die Chiptemperatur stark ändert. Es ist ersichtlich, dass der Wärmetransport in der Leuchte NOAM mit einer Schraubenverbindung der Leiterplatte mit dem Kühlkörper durch den Einsatz der Wärmeleitpaste im Vergleich zu reinem metallischem Kontakt zwar verbessert wird, aber nicht so gut, wie bei einer idealen Verbindung ohne jeglichen thermischen Kontaktwiderstand. Eine vergleichbar höhere Chiptemperatur lässt sich beim Einsatz des Wärmeleitklebers erwarten, da er kein besonders guter Wärmeleiter ist. Aus diesem Grund wird die Leiterplatte auf den Kühlkörper mittels einer Schraubenverbindung mit Wärmeleitpaste befestigt.

Tabelle 6.8: Vergleich der Simulationsergebnissen für unterschiedliche Verbindungsmöglichkeiten der Leiterplatte zum Kühlkörper ($P_{th}=3,8 \text{ W}$, $T_U=30^\circ\text{C}$)

Verbindung	Max. Chip- temperatur [°C]	Max. Oberflächentemperatur am Kühlkörper [°C]	Thermischer Gesamtwiderstand [K/W]
Ideale Verbindung	85,5	53,3	14,6
Schraubenverbindung ohne Wärmeleitpaste	89,1	53,3	15,6
Schraubenverbindung mit Wärmeleitpaste	86,2	53,3	14,8
Pressverbindung mit Wärmeleitkleber	93,2	53,2	16,6

6.1.2 PHASE 2: FERTIGUNG

Bis hierhin fand die Entwicklung in einer virtuellen Umgebung innerhalb von Software und Berechnung statt. Nun wird durch geeignete Wahl des Fertigungsverfahrens und der Bearbeitungstechnologie sichergestellt, dass die geforderte Systemfunktionalität auch bei der Fertigung und Herstellung gezielt erreicht wird.

TOLERIERUNG

Im Rahmen der Tolerierung wird für jedes funktionsrelevante Element der Leuchte NOAM definiert, wie weit es von seiner Idealgestalt abweichen darf, um dennoch fertigungstechnisch fehlerfrei realisierbar, montagegerecht und kostengerecht zu sein.

Da aus technischer Sicht eine auf dem Markt erhältliche bestückte Metallkern-Platine als Schaltungsträger der Leuchte NOAM gewählt wurde, liegt das Augenmerk nun auf dem Fertigungsprozess des Kühlkörpers. Aus dem Optikdesign ergab sich eine maximal zulässige Positionstoleranz von $\pm 0,5$ mm, um eine möglichst rotationssymmetrische Lichtstärkeverteilung ohne unerwünschte Nebeneffekte auf der Zielfläche zu erreichen. Durch die Lötstopmmaske der Leiterplatte wird bereits eine Positionsgenauigkeit der LED auf der Leiterplatte von $\pm 0,2$ mm gewährleistet. Für die Realisierung der Schraubenverbindung der Leiterplatte mit dem Kühlkörper muss der tatsächliche Bohrungsmittelpunkt in einem Kreis mit 0,2 mm Durchmesser liegen, dessen Mittelpunkt mit dem theoretisch exakten Ort der jeweiligen Bohrung übereinstimmt. Die Oberflächengüte am Befestigungszylinder wird hier in Form des arith-

metischen Mittelwertes R_a der Abweichungen von der Mittellinie angegeben und entspricht einem typischen Wert einer gefrästen Oberfläche von $3,2\text{ }\mu\text{m}$, wobei seine tolerierte Fläche zwischen zwei parallelen Ebenen vom Abstand $0,001\text{ mm}$ liegen muss. Der Einfluss der beiden maschinell bearbeiteten Oberflächen auf die Wärmeleitung soll hier durch den Einsatz der Wärmeleitpaste reduziert werden.

Eine Herausforderung für die fehlerfreie Funktionalität des Thermomanagements stellt hier die Verbindung des Befestigungszyinders mit dem Aluminium-Rundrohr des Kühlkörpers dar. Um eine gute Wärmeübertragung an der Kontaktstelle zu gewährleisten, ist eine möglichst flächenhafte Verbindung beider Körper mit einer 100%-Kontaktfläche anzustreben. Diese lässt sich mittels einer stoffschlüssigen Verbindung realisieren, wobei die beiden Körper vor allem durch molekulare oder atomare Kraftwirkung zusammengehalten werden.

FERTIGUNGSEIGNUNG UND HERSTELLBARKEIT

Der Kühlkörper der Leuchte NOAM wird aus zwei Aluminium-Teilen mittels stoffschlüssiger Verbindung realisiert. Dabei handelt es sich um ein Aluminium-Rundrohr mit dem Außendurchmesser von 20 mm und einer Aluminium-Hülse mit dem gleichen Außendurchmesser wie das Rohr. Die stoffschlüssige Verbindung der beiden Elemente entsteht durch Schweißen. Dafür werden die zu verbindenden Kanten der beiden Elemente zuerst in einem Winkel von 60° abgeschrägt. Als nächstes werden die beiden Stirnflächen parallel aneinandergelegt und aufgeschmolzen, wobei durch Zugabe von geschmolzenem Schweißzusatzwerkstoff

eine sogenannte V-Naht entsteht. Als nächstes wird für einen stufenfreien Übergang zwischen beiden verbundenen Aluminium-Teilen die Schweißnaht auf einen Außendurchmesser von 20 mm abgedreht und mit Hilfe einer Biegevorrichtung in die gewünschte Form gebracht.

Beim Verschweißen von Bauteilen aus Aluminium muss eine Besonderheit dieses Leichtmetalls berücksichtigt werden: An der Luft verbindet sich die blanke Metalloberfläche mit dem Luftsauerstoff zu Aluminiumoxid. Diese Schicht ist ausgesprochen hart und schmilzt erst bei ca. 2050 °C. Während das darunterliegende Aluminium je nach Zusammensetzung eine Schmelztemperatur von ca. 580 °C-660 °C besitzt. Eine dauerhafte stoffschlüssige Verbindung mit dem Aluminium entsteht nur in dem Fall, wenn die beiden Metalle direkt miteinander verbunden sind. Wird die Oxidschicht nicht durchdrungen, so wird die Verbindung nicht dauerhaft und bricht nach dem Abkühlen wieder auseinander.

Aus diesem Grund kommt für das Schweißen von Aluminium und seinen Legierungen bevorzugt das Wechselstrom-Schweißverfahren zum Einsatz. Der Lichtbogen baut sich dabei abwechselnd einmal von der Schweißelektrode zum Werkstück auf und umgekehrt. Letzteres bewirkt das gewünschte Entfernen bzw. Aufreißen der Oxidschicht.

Die beschriebene Möglichkeit zur Fertigung des Kühlkörpers ist für den Prototypbau nur aufwendig und kostenintensiv umsetzbar. Zur Reduzierung der Anzahl der dabei notwendigen Fertigungsschritte wird eine weitere Rohr-in-Rohr-Lösung erarbeitet. Dabei wird der Befestigungszylinder als ein zusätzliches Bauteil aus Aluminium mit dem Außendurchmesser 17 mm und der Wanddicke 1 mm gefräst und anschließend mit Außen-Gewinde versehen (Abbildung 6.8 links). Im gebogenen Aluminium-Rundrohr wird ebenso ein Gewinde geschnitten, so

dass beide Teile mittels einer Schraubenverbindung miteinander befestigt werden können (Abbildung 6.8 rechts). Außerdem wird für den Prototypbau ein dünnwandiges Aluminium-Rundrohr mit einer Wandstärke von $w=1,5\text{ mm}$ zur Reduzierung des Biegeaufwandes gewählt, der mit der Wanddicke des Aluminium-Rundrohrs überproportional ansteigt.

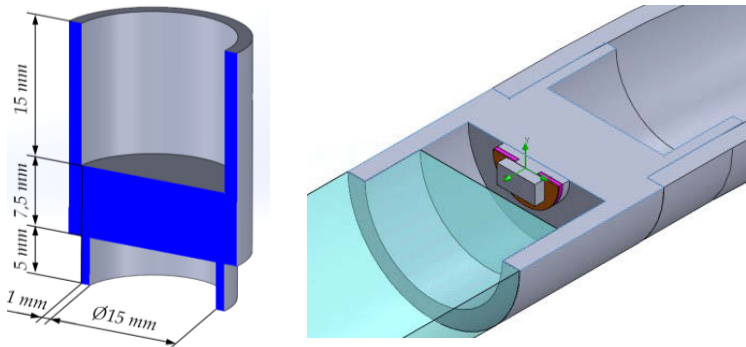


Abbildung 6.8: Rohr-in-Rohr-Lösungskonzept für den Fertigungsprozess des Kühlkörpers: Befestigungszylinder als zusätzliches Bauteil (links) und das gesamte Modell der Leuchte NOAM in der Querschnitt-Darstellung (rechts)

Da hierbei der Initialentwurf der Leuchte NOAM stark verändert wird, ist gemäß Abbildung 4.5 eine Überarbeitung des thermischen Designs nötig, um die geforderte Systemzuverlässigkeit zu gewährleisten. Dabei werden auf Basis des überarbeiteten Finite-Elemente-Modells der Leuchte NOAM wieder Parameteroptimierung mit Hilfe von thermischen Simulationen durchgeführt ($P_{th}=3,8^\circ\text{W}$, $T_U=30^\circ\text{C}$). Eine optimale Lösung für die Thermomanagementaufgabe wird bei einer Zylinderdicke von $d=5\text{ mm}$, einem Emissionskoeffizienten der lackierten Kühlkörperoberfläche von $\varepsilon=0,95$ und einer Schraubenverbindung der

Leiterplatte mit dem Kühlkörper mittels Wärmeleitpaste erwartet. Dabei liegt die durchschnittliche Chiptemperatur bei $T_J=89,0\text{ °C}$ und die maximale Oberflächentemperatur des Kühlkörpers bei $53,6\text{ °C}$.

Des Weiteren wird der Wärmetransport im Simulationsmodell bei unterschiedlichen Verbindungsmöglichkeiten der Rohr-in-Rohr-Lösung untersucht. Tabelle 6.9 fasst die Ergebnisse der durchgeführten Simulation zusammen. Wie daraus hervorgeht, verursacht der Einsatz der Wärmeleitpaste bei einer Schraubenverbindung einen vernachlässigbar geringeren Unterschied sowohl der Chiptemperatur als auch der Oberflächentemperatur am Aluminium-Rundrohr im Vergleich zu einer idealen Verbindung der beiden Kühlkörperteile. Somit wird eine gute Wärmeübertragung an der Kontaktstelle der beiden Teile mittels einer Schraubenverbindung gewährleistet, so dass die angestrebten Ziele des Thermomanagements erreicht sind.

Tabelle 6.9: Vergleich der Simulationsergebnissen für unterschiedliche Verbindungsmöglichkeiten der Rohr-in-Rohr-Lösung ($P_{th}=3,8\text{ W}$, $T_U=30\text{ °C}$)

Verbindung	Max. Chip- temperatur [°C]	Max. Oberflächen- temperatur am Kühlkörper [°C]	Thermischer Gesamtwider- stand [K/W]
Ideale Verbindung	89,0	53,6	15,5
Schraubenverbin- dung ohne Wär- meleitpaste	93,1	54,3	16,6
Schraubenverbin- dung mit Wär- meleitpaste	90,5	53,9	15,9

Im nächsten Schritt wird die Tolerierung durchgeführt. Sofern die festgelegten Toleranzen bei der Überarbeitung des Initialentwurfs bereits ausreichend berücksichtigt wurden, beinhaltet die Entwicklung zum Lösungskonzept für den Fertigungsprozess keine wesentlichen Änderungen der geometrischen Abmessungen von Systemkomponenten. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass beim festgelegten Fertigungsverfahren und der Bearbeitungstechnologie des Leuchten-Kühlkörpers die geforderte Systemfunktionalität wie gewünscht erreicht wird. Somit ist die Phase der Fertigung abgeschlossen und mündet in das Lösungskonzept für den Fertigungsprozess.

6.1.3 PHASE 3: VALIDIERUNG

Im nächsten Schritt wird der erarbeitete Lösungsansatz in Form eines Prototyps realisiert. Zur praxisnahen Validierung des Vorgehensmodells der Entwicklungssystematik mit allen Restriktionen wird absichtlich in dieser Phase anstelle der Rohr-in-Rohr-Verbindung eine andere Verbindung realisiert. Dabei wird der Befestigungszyylinder mit dem Aluminium-Rundrohr mittels unlösbarer Pressverbindung befestigt. Das Aluminium-Rundrohr hat dabei eine unbehandelte Außenoberfläche. Außerdem wird, anders wie während der Phase der Fertigung festgelegt, die Leiterplatte nur mit einer M3-Schraube auf diesen Befestigungszyylinder angebracht. Für einen stufenfreien Übergang zwischen Aluminiumrohr und Lichtstab wird anschließend der Durchmesser am Ende des Stabs um 4 mm verkleinert, sodass der Lichtstab in das Aluminiumrohr formschlüssig aufgesteckt werden kann. Mit dem in Abbildung 6.9 dargestellten Prototyp wird im Folgenden überprüft, ob die thermischen

Vorüberlegungen und Berechnungen mit der Messung übereinstimmen. Basierend darauf erfolgt anschließend die Bewertung der funktionalen Auslegung des Thermomanagements.



Abbildung 6.9: Foto der Tischleuchte NOAM, die im Showroom „siluet“ auf der Messe „Light & Building 2014“ ausgestellt wurde [83]

THERMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Zur Messung wird das am LTI des KIT zur Verfügung stehende Messsystem T3Ster des Herstellers Mentor Graphics Corporation eingesetzt.

Dabei wird, wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben ist, die zeitliche Änderung der Chiptemperatur der LED zwischen zwei stabilen Temperaturzuständen in Folge einer Leitungsänderung aufgezeichnet. Da sich das betrachtete LED-System im Betrieb die meiste Zeit im thermisch stabilen Zustand befindet, wird die Chiptemperatur im stabilen Zustand nach

Gleichung (2.23) verwendet. In diesem Zustand kann die Chiptemperatur aus der thermischen Verlustleistung P_{th} , dem thermischen Gesamtwiderstand zwischen LED und Umgebungsluft $R_{th\,JU}$ und der Umgebungstemperatur T_U berechnet werden.

Vorab muss in einer Kalibrierung die temperaturabhängige Änderung der Spannung gemessen wurden. Dafür wird das LED-System in einer Klimakammer kalibriert. Gemessen wird die Änderung der Spannung, ausgehend von 25 °C, in 5 °C Schritten, bis hin zu 90 °C. Die Messwerte werden nach einer Stabilisierungsphase von 120 s aufgezeichnet. Bei einem Messstrom von $I_M=10\text{ mA}$ wird eine Sensitivität von $k = -1,39\text{ mV/K}$ ermittelt. Die Ausgleichsgeraden und die Messwerte der Kalibrierungsmessung sind in Abbildung 6.10 zu sehen.

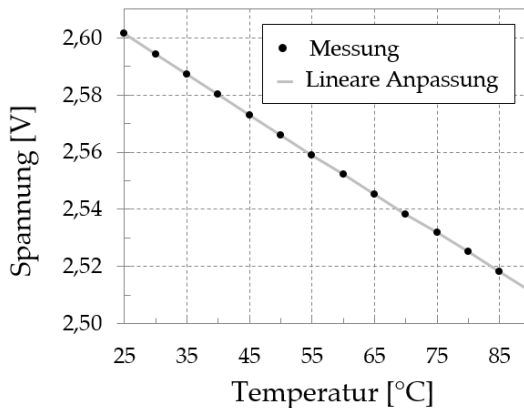


Abbildung 6.10: Messung der Temperaturabhängigkeit der Spannung zur Kalibrierung der Messung zur Chiptemperatur

Der erste Parameter aus Gleichung (2.23) ist die thermische Verlustleistung, die sich aus der Leistungsdifferenz ΔP_{th} zwischen den stabilen Niveaus P_{thH} und P_{thM} folgendermaßen berechnen lässt:

$$\Delta P_{th} = P_{thH} - P_{thM} \quad (6.9)$$

Dabei muss die elektrische Leistung nach Gleichung (2.24) noch um die als Licht emittierte optische Leistung reduziert werden. Die optische Leistung kann nach Gleichung (2.25) über die optische Effizienz η der LED ausgedrückt werden, die unter anderem vom Betriebsstrom und der Chiptemperatur abhängig ist.

Da die Messung im thermisch stabilen Bereich mit der Temperatur T_{J1} gestartet wird, ist das Leistungsniveau P_{thH} zu Beginn der Messung konstant. Somit kann dieses Niveau nach Gleichung (2.24) mithilfe der elektrischen Leistung P_{e1} sowie der Effizienz η folgendermaßen berechnet werden:

$$\begin{aligned} P_{thH} &= P_{e1}(T_{J1}) \cdot (1 - \eta_{T_{J1}}) = \\ &= I_1 \cdot U_1(T_{J1}) \cdot (1 - \eta_{T_{J1}}) \end{aligned} \quad (6.10)$$

Das Leistungsniveau P_{thM} berechnet sich im thermisch stabilen Bereich mit der Temperatur T_{J2} analog. Somit gilt für die Leistungsdifferenz ΔP_{th} zwischen den stabilen Niveaus folgender Ausdruck:

$$\begin{aligned} \Delta P_{th} &= I_1 \cdot U_1(T_{J1}) \cdot (1 - \eta_{T_{J1}}) - I_2 \cdot U_2(T_{J2}) \cdot \\ &\quad \cdot (1 - \eta_{T_{J2}}) \end{aligned} \quad (6.11)$$

Die elektrische Leistung eines LED-Systems wird durch das Einstellen der Ströme $I_H=1,5\text{ A}$ und $I_M=10\text{ mA}$ festgelegt, welcher im LED-System über das EVG geregelt wird. Die optische Effizienz η der LED wird in den zwei thermisch stabilen Bereichen mit den Temperaturen T_{J1} und T_{J2} bestimmt. Dabei wird unter der Berücksichtigung der Spektralverteilung der LED aus dem mit einem goniometrischen Verfahren gemessenen Lichtstrom der Wirkungsgrad berechnet. Für die photometrische Analyse der Prototypen wurde das am LTI zur Verfügung stehende Goniophotometer RiGO801 der Firma Technoteam verwendet. Die gemessenen elektrischen sowie die berechneten optischen Größen sind in Tabelle 6.10 aufgeführt.

Tabelle 6.10: Übersicht der gemessenen elektrischen sowie der berechneten optischen Größen

	Spannung $U(T_J)$ [V]	Verlustleistung P_{th} [W]	Lichtstrom $\Phi(T_J)$ [lm]	Optische Effizienz η_{T_J} [%]
Heizstrom $I_H = 1,5\text{ A}$	3,1	3,53	351,5	24,1
Messstrom $I_M = 10\text{ mA}$	2,5	$16,65 \cdot 10^{-3}$	2,7	33,4

Daraus lässt sich mithilfe der elektrischen Leistung und der optischen Effizienz eine Leistungsdifferenz von $\Delta P_{th}=3,6\text{ W}$ berechnen. Durch das Einsetzen dieser Leistungsdifferenz in Gleichung (2.23) ergibt sich ein thermischer Widerstand von $R_{th JU}=22,5\text{ K/W}$. Mit diesem thermischen Widerstand und der Umgebungstemperatur $T_U=25\text{ °C}$ ergibt sich die Chiptemperatur der LED $T_J=104,2\text{ °C}$.

In Abbildung 6.11 ist die differentielle Strukturfunktion dieser Messung dargestellt, die die Änderung der thermischen Kapazität über dem thermischen Widerstand zeigt. Anhand der lokalen Maxima ist es möglich, die Wendepunkte in der Strukturfunktion zu erkennen und so eine Analyse der einzelnen Strukturelemente im thermischen Pfad durchzuführen.

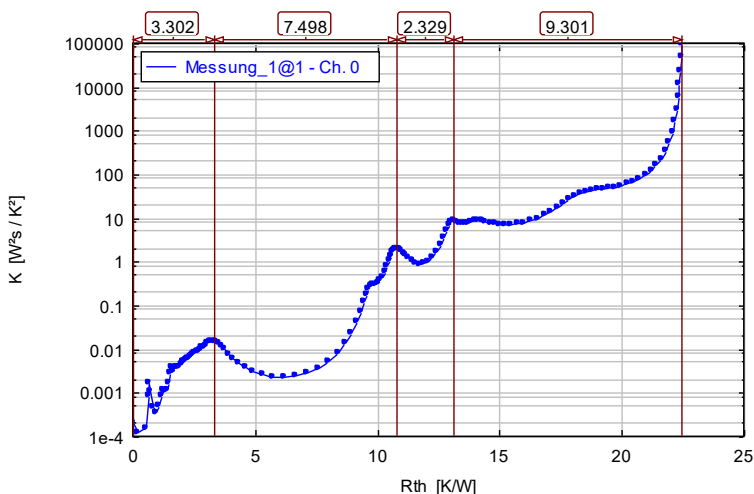


Abbildung 6.11: Differentielle Strukturfunktion der Leuchte NOAM, die zur Identifizierung und anschließender Analyse der einzelnen Strukturelemente verwendet wird

Gleich zu Beginn der Kurve $R_{th}=0,6$ K/W bei ist ein markanter Peak zu erkennen. Da die Wärme in der LED entsteht, handelt es sich bei diesem Abschnitt der Strukturfunktion um den thermischen Widerstand des Halbleiters. Zwischen dem Halbleitermaterial und dem Chipträger befinden sich mehrere Verbindungsschichten, die sich anhand der folgenden Maxima erkennen lassen. Für den thermischen Widerstand der LED lässt

sich aus der Grafik ein Wert von $R_{th JB}=3,3$ K/W ablesen. Das nächste Strukturelement ist die Leiterplatte mit den zwei Schrauben und der Wärmeleitpaste mit dem thermischen Widerstand von $R_{th BP}=7,5$ K/W. Dann folgt der Kühlkörper, an dessen Ende die Strukturfunktion gegen unendlich strebt. Dabei lässt sich ein Wert von $R_{th PU}=9,3$ K/W für den thermischen Widerstand des Kühlkörpers ablesen. Bei der Messung ist zu Beginn des Kühlkörpers noch ein ca. 1,4 K/W großes Plateau in der differentiellen Strukturfunktion zu erkennen. Dies lässt auf eingeschlossene Luft zwischen zwei Teilen des Kühlkörpers schließen.

Anschließend wird die Oberflächentemperatur an der Außenseite des Aluminiumrohrs auf LED-Höhe mithilfe einer punktuellen Temperaturmessung erfasst. Dazu wird ein 2-Kanal-Thermoelementmessgerät TC 301 mit Temperaturfühlern NiCr-Ni (Typ K) der Firma Dostmann electronic verwendet. Es wurde eine maximale Oberflächentemperatur von ca. 55,6 °C gemessen.

BEWERTUNG DES THERMOMANAGEMENTS

Tabelle 6.11 zeigt den Vergleich der gewonnen Messdaten mit den Simulationsergebnissen des in Abschnitt 6.1.1 vorgestellten Modells (s. S. 167). Dabei handelt es sich um die Ergebnisse der neuen thermischen Simulation, die aus Vergleichsgründen bei einer Verlustleistung von $P_{th}=3,6$ W und einer Umgebungstemperatur von $T_U=25$ °C durchgeführt wurde. Hier ist eine relativ gute Übereinstimmung der Werte für den thermischen Widerstand der LED erkennbar. Die Differenz zwischen berechneten und gemessenen Werten für thermische Widerstände

der Leiterplatte von ca. 1,9 K/W lässt sich auf das Vorhanden eines größeren thermischen Kontaktwiderstandes zwischen der Leiterplatte und dem Kühlkörper beim Prototyp schließen. Obwohl dabei eine Wärmeleitpaste an der Kontaktstelle zur verbesserten Wärmeübertragung aufgetragen wurde, ist die Wärmeleitung im System durch geringere Kontaktkraft mit nur einer Schraube erheblich beeinträchtigt.

Tabelle 6.11: Vergleich der Chiptemperatur sowie der Oberflächentemperatur des Kühlkörpers aus der indirekten Messung der LED-Spannung und der Simulation

	Simulation	Messung
Max. Chiptemperatur der LED [°C]	87,9	104,2
Max. Temperatur an der Kühlkörperoberfläche [°C]	51,4	55,6
Thermischer Gesamtwiderstand des Systems [K/W]	16,6	22,5
Thermischer Widerstand der LED [K/W]	3,9	3,3
Thermischer Widerstand der Leiterplatte [K/W]	5,6	7,5
Thermischer Widerstand des Kühlkörpers [K/W]	7,1	11,7

Der Vergleich der Werte für thermischen Widerstand des Kühlkörpers ergibt eine Differenz von ca. 4,6 K/W. Diese wird vor allem durch die Beeinträchtigung der Wärmeleitung im Kühlkörper verursacht. Dabei führt die nicht optimale Verbindung zwischen zwei Teilen des Kühlkörpers zu einem unerwünschten Temperatursprung an der Grenzfläche im

Prototyp, wobei ein die Wärmeleitung verhinderndes Luftpolster an der Kontaktstelle entsteht. Dadurch fließt der gesamte Wärmestrom durch die reduzierte Gesamtfläche hindurch. Somit erklärt dies, warum die gemessene maximale Temperatur an der Kühlkörperoberfläche geringfügig oberhalb des Simulationsergebnisses liegt. Außerdem weist die unbehandelte Kühlkörperoberfläche des Prototyps einen geringeren Emissionskoeffizienten auf. Dies bewirkt eine Reduktion der Wärmeübertragung an die Umgebung durch Strahlung, wodurch sich der thermische Widerstand des Kühlkörpers vergrößert.

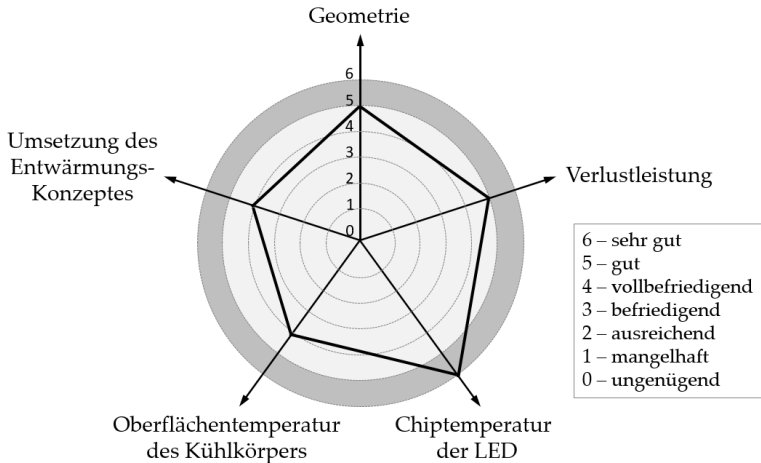


Abbildung 6.12: Spinnennetzdiagramm für die Analyse und Bewertung des Prototyps der Leuchte NOAM

Im nächsten Schritt wird der realisierte Prototyp der Leuchte NOAM anhand der Zielparmeter aus Abschnitt 6.1.1 bewertet. Das in Abbildung 6.12 dargestellte Spinnennetzdiagramm zeigt die jeweiligen Ausprägungen hinsichtlich der fünf Soll-Kriterien auf. Diese sind Geometrie,

Verlustleistung, Chiptemperatur der LED, Oberflächentemperatur des Kühlkörpers und technische Umsetzung des Entwärmungskonzeptes. Zur Bewertung der einzelnen Kriterien ist jedes Merkmal mit einer siebenstufigen Skala hinterlegt. Da bei der Entwicklung in erste Linie eine optimale Lösung für ein effizientes Thermomanagement angestrebt wurde, soll die Bewertung der einzelnen Kriterien die Bewertung „gut“ möglichst nicht übersteigen. Falls dagegen die Bewertung „befriedigend“ für mindestens ein Kriterium erreicht wird, soll das Entwärmungskonzept überarbeitet werden.

Das thermische Verhalten des Prototyps macht deutlich, dass es mit den aufgezeigten Methoden erreicht werden kann, die LED-Leuchte bei definierter maximaler Verlustleistung mit definierter maximaler Chiptemperatur der LED zu betreiben. Hierbei ist der Kühlkörper für die Wärmeabfuhr der verwendeten High Power LED in die gebogene Form der Leuchte integriert und dient gleichzeitig als Standfuß der Leuchte. Allerdings wird der Prototyp in Bezug auf das Kriterium „Chiptemperatur“ mit Bewertung „sehr gut“ bewertet, da die gemessene maximale Chiptemperatur der LED deutlich unter dem definierten Zielwert von 125 °C liegt. Da dabei die maximale Oberflächentemperatur des Kühlkörpers an der oberen Grenze des gewünschten Streubereiches des Zielwertes liegt, werden beim Kriterium „Oberflächentemperatur des Kühlkörpers“ Abstriche gemacht.

Außerdem wird der Prototyp in Bezug auf das Kriterium „Technische Umsetzung des Entwärmungskonzeptes“ mit der Note 4 bewertet, da die unvollkommene Verbindung zwischen zwei Teilen des Kühlkörpers zu einem unerwünschten Temperatursprung an der Grenzfläche führt.

Obwohl dabei ein zuverlässiger Betrieb des Moduls über mehrere tausend Stunden erfolgen kann, kann diese Fehlerquelle mit der Zeit zur erheblichen Beeinträchtigung der fehlerfreien Funktionalität des LED-Systems führen. Somit sind weitere Modifikationen des Herstellungsprozesses nötig, um eine bessere Übereinstimmung des Prototyps mit den durch die thermische Dimensionierung vorgegebenen Eigenschaften der Bauteile zu erwirken.

Für die Weiterentwicklung der Leuchte NOAM ist in Zukunft außerdem eine kabellose Variante geplant. Dazu sollen Akku und Treiber zusätzlich zur LED im Aluminiumrohr untergebracht werden. Die dazu notwendigen Anpassungen sollen in ein weiteres Funktionsmuster einfließen, bevor die Leuchte NOAM weiter an die nächste Phase der Produktentstehung, die Produktionssystementwicklung übergeben wird. Das ist nicht mehr Teil dieser Arbeit.

6.2 ANWENDUNGSBEISPIEL: STRAßENLEUCHTE

Beim ersten Anwendungsbeispiel wurde das Funktionsmodul des Thermomanagements relativ isoliert von anderen Modulen ausgelegt, wodurch das systematische Vorgehen für den domänenspezifischen Entwicklungsprozess des Thermomanagements samt allen Rücksprüngen verifiziert wurde. Beim zweiten Validierungsbeispiel soll der grundsätzliche Ablauf einer disziplinübergreifenden Entwicklung von LED-Systemen in der Allgemeinbeleuchtung demonstriert werden. Hierbei handelt es sich um die thermische Dimensionierung einer Straßenbeleuchtungsanlage, wobei sich eine sehr enge Kopplung der Funktionsmodule der

Optik und des Thermomanagements ergibt. Dies setzt neben einer ständigen modulinternen auch eine ständige modulübergreifende Abstimmung der beteiligten Domänen innerhalb der Phase der domänenspezifischen Entwicklung voraus.

In jüngerer Zeit kommen zunehmend Hochleistungs-LEDs als Lichtquellen der Straßenleuchten zum Einsatz. Sie bieten eine hohe Lichtausbeute, weisen jedoch nach Stand der Technik baubedingt Nachteile in der praktischen Anwendung auf: Die Optik auf Basis einer punktförmigen Lichtquelle kann eine hohe Blendungswirkung verursachen und die Kühlung verursacht noch erhebliche Schwierigkeiten, verbunden mit einer signifikanten Reduktion der erzielbaren Produktlebensdauer. Auch resultieren aus der Einzelbestückung jeder LED mit einer Linse und der getrennten Ausführung von Reflektoren und Kühlelementen erhebliche Fertigungsaufwände.

Vor dem Hintergrund der Problemanalyse wird während der lösungsneutralen funktionalen Systembeschreibung ein modularer Aufbau bei gleichzeitiger Reduktion der Komponenten auf wenige multifunktionale Bausteine angestrebt, um eine einfache Anpassung an wechselnde Anforderungen bezüglich der Abstrahlungsgeometrie und der LED-Anzahl und -Leistung kostengünstig zu ermöglichen. Ferner werden dadurch weitreichende Vorteile bezüglich Fertigungskosten, Montage, Leistungsprofil, Wartung und Lebensdauer der Beleuchtungsanlage erzielt.

Abbildung 6.13 zeigt das Prinzip der angestrebten Anordnung für eine LED im Querschnitt. Dabei wird ein einheitlicher Reflektor verwendet, der sowohl der Wärmedissipation als Kühlkörper mit effizienter Anbindung als auch durch eine Freiform-Reflektorstruktur auf der Innenseite als lichtlenkendes Bauteil dient. Das optische Element aus Kunststoff

(PMMA) soll einen weiteren Teil des Lichts erfassen und durch die integrierte Freiform-Linsenfläche eine effiziente Lichtlenkung erreichen.

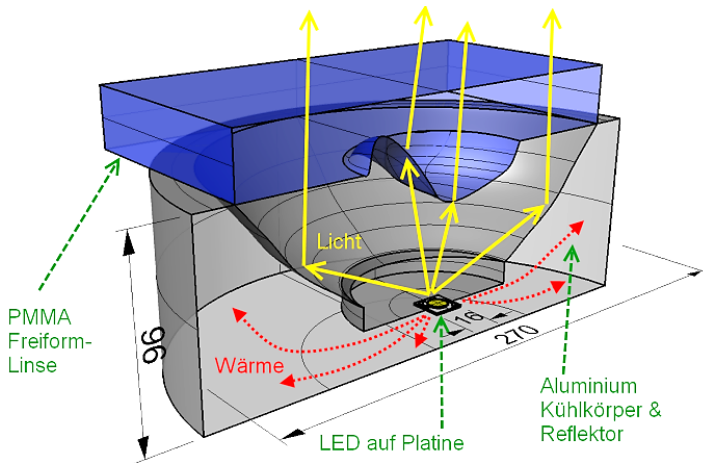


Abbildung 6.13: Schemazeichnung der angestrebten LED-Straßenleuchte: Wärme- und Lichtpfade sind rot und gelb skizziert [87]

6.2.1 PHASE1: DESIGN

RANDBEDINGUNGEN UND ZIELPARAMETER

Außenleuchten werden nach den international gültigen Prüfnormen für eine Nennspannung von $230\text{ V} \pm 10\%$, eine Nennfrequenz von 50 Hz und eine Bemessungs-Umgebungstemperatur von $t_a = \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$, die einer realen Umgebungstemperatur von $25\text{ }^\circ\text{C}$ entspricht, ausgelegt [88]. In der Regel findet die Funktionskontrolle der Außenleuchte bei Tageslicht

und bei hoher Sonneneinstrahlung statt. Dadurch steigt die Leuchten-Innentemperatur weit über die genormten Prüfbedingungen hinaus an. Die thermische Belastung von Leitungen, Fassungen, Isolierungen und Komponenten nimmt dadurch zu. Durch die in EN 60598-1 [89] auch für Außenleuchten vorgeschriebene Dauerprüfung bei $t_a + 10\text{ °C} = 25\text{ °C}$ über 7-10 Tage wird sichergestellt, dass ein Betrieb der Leuchte auch bei zeitweiliger Übertemperatur ohne Beeinträchtigungen möglich ist. Die Prüftemperatur von 25 °C entspricht aufgrund der in der Praxis auftretenden Luftbewegung einer realen Umgebungstemperatur von 35 °C [88].

Die Schutzart wird durch den IP-Code (von engl. „Ingress Protection“) gekennzeichnet, der nach IEC 60598-1 aus zwei Ziffern besteht. Die erste Ziffer betrifft den Fremdkörperschutz, die zweite Ziffer den Wasserschutz. Aus der Schutzartanalyse der auf dem Markt erhältlichen Straßenleuchten folgt, dass bei Außenleuchten (keine Tunnelbeleuchtung) mindestens die Schutzart IP44 eingehalten werden soll. Gemeinsam mit dem Projektpartner wird im Hinblick auf die weitere Entwicklung der Straßenleuchten die Schutzart IP45 festgelegt. Damit wird ein Schutz gegen feste Fremdkörper, die im Durchmesser größer als $1,0\text{ mm}$ sind, sowie gegen kleine Insekten und Schutz gegen Strahlwasser gewährleistet.

Eine weitere Randbedingung, die sich durch die Wahl der Basiskomponenten ergibt und die bei der funktionalen Auslegung des Thermomanagements zu berücksichtigen ist, ist die Lichtquelle der Straßenleuchte. Diese wurde während des Optik-Designsprozesses auf die Samsung LED LC040B festgelegt. Der thermische Widerstand zwischen der aktiven Zone der LED und dem thermischen Anschlusspad ist vom Hersteller mit $0,8\text{ K/W}$ angegeben [90].

Die Aufgabe ist es zunächst, eine maximale in Wärme umgesetzte Verlustleistung von $P_{th} = 1,08 \text{ A} \times 38,5 \text{ V} = 41,6 \text{ W}$ so gut abzutransportieren, dass an der aktiven Zone der LED eine möglichst geringe Temperatur herrscht, die $T_{j\max} = 80^\circ\text{C}$ nicht übersteigt. Die maximale Verlustleistung ergibt sich beim Betrieb der Leuchtdiode mit einer Stromstärke von 1,08 A und dem optischen Wirkungsgrad von $\eta = 0\%$. Die Maximaltemperatur für die aktive Zone der Samsung LED LC040B ist hier mit 80°C definiert, damit der Lichtstromrückgang gegenüber 25°C von mindestens 10% gewährleistet wird [90]

Ausgehend von der geforderten multifunktionalen Bauweise der Leuchte sorgt ein Freiform-Reflektor für optimierte Lichtausbeute und Kühlleistung. Ausgehend von unterschiedlichen Materialien und Materialkombinationen muss hier eine Lösung entwickelt werden, die eine zuverlässige Wärmeabfuhr bei möglichst geringen Bauraumanforderungen und guter fertigungstechnischer Umsetzbarkeit ermöglicht. Angestrebt wird dabei ein geringes Eigengewicht der Leuchte von 4,5 kg.

Im Vorfeld des Projekts wurde außerdem festgelegt, dass ein hoch-effizientes Wärmemanagement durch direktes Anbinden der Kühlelemente an die LEDs gewährleistet werden soll. Dabei wird die LED derart in die Leiterplatte eingelassen, dass ihre elektrische Versorgung seitlich möglich und somit die LED rückseitig direkt und ohne zusätzliche thermische Widerstände an den Kühlkörper angekoppelt ist. Die Herausforderung besteht dabei in der Realisierung der optimalen Verbindung zwischen der LED und dem Kühlkörper.

Außerdem wurde in enger Abstimmung mit dem Projektpartner entschieden, die elektrischen Vorschaltgeräte zur Reduzierung der dadurch

hervorgerufenen thermischen Zusatzbelastung in Kabelanschlusskasten im Mast einzubauen, der durch eine Tür gegen Unbefugte gesichert ist.

Ferner wird eine strömungstechnisch optimierte Konstruktion der Leuchte angestrebt, die die Selbstreinigung durch Wind und Regen bewirkt und einen wesentlichen Einfluss auf den Wartungsfaktor der Straßenleuchte hat.

KONZEPTUELLE AUSLEGUNG

Durch Nutzung des Freiform-Reflektors als Dissipationsfläche sind bereits gute Ausgangsbedingungen für eine leistungsfähige passive Kühlung gegeben. Die angestrebten möglichst geringen Anlagen- und Energiekosten begünstigen die Wahl der passiven Luftkühlung.

Für die Wärmeübertragung lässt sich ein in Abbildung 6.14 dargestelltes Ersatzmodell aufstellen. Der thermische Gesamtwiderstand der Straßenleuchte ergibt sich aus den Summen der Einzelwiderstände im Wärmepfad von der aktiven Zone zur Umgebung und soll nach Gleichung (4.1) den Wert $R_{th\ JU\ max} = 1,2\ \text{K/W}$ nicht übersteigen.

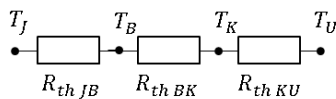


Abbildung 6.14: Schematische Darstellung des Wärmeflusses in der Straßenleuchte in Form eines Ersatzschaltbilds

Durch die direkte Anbindung der LED an den Kühlkörper bewegt sich die an der aktiven Zone erzeugte Wärme entlang des vereinfachten Wärmefehlpfads von der aktiven Zone zur Lötstelle ($R_{th JB}$), von dort über den Kühlkörper ($R_{th BK}$) an die Umgebung ($R_{th KU}$). Mit dieser Anordnung der LED an einen durchgängigen Kühlkörper wird ein zusätzlicher thermischer Widerstand der Wärmeleitung durch eine Platine vermieden.

Der Projektpartner, die Firma K + B electronic systems GmbH, hat bereits im Vorfeld eine neuartige Möglichkeit für ein hoch-effizientes Wärmemanagement durch direktes Anbinden der Kühlelemente an die LEDs konzipiert. Die LEDs sind nach der durch K+ B electronic systems patentierten Methode (Patent EP2541139A2, „LED Beleuchtungsmodul“) derart in der Leiterplatte eingelassen, dass ihre elektrische Versorgung seitlich möglich ist und die LEDs rückseitig direkt und ohne zusätzliche thermische Widerstände an einen Kühlkörper angebunden werden können.

Der resultierende thermischere Gesamtwiderstand des Kühlkörpers setzt sich aus dem thermischen Widerstand der Wärmeleitung im Kühlkörper $R_{th L}$, dem thermischen Widerstand der Wärmekonvektion $R_{th K}$ und der Wärmestrahlung $R_{th S}$ zusammen. Dabei berechnet sich der thermische Widerstand der Wärmeleitung im Kühlkörper $R_{th L}$ aus den parallelgeschalteten Einzelwiderständen des Reflektors und der Mastanbindung mit dem Mastaufsatzstück. Die Letzteren haben die Aufgabe, die Leuchte an geeigneter Stelle und in richtiger Position in Bezug auf die zu beleuchtende Fläche zu platzieren. Da es sich dabei typischerweise um großflächige Teile aus gut wärmeleitenden Leichtmetallen handelt, bietet die gezielte Auslegung dieser Mastbefestigungskomponente eine zusätzliche Möglichkeit zur Reduzierung des thermischen Gesamtwiderstandes

der Straßenleuchte. Um eine Anpassung an wechselnde Anforderungen bezüglich der Mastmontage ohne jegliche Benachteiligung der Funktionalität des Thermomanagements zu ermöglichen und somit einen zusätzlichen Sicherheitsfaktor zu gewährleisten, wird auf die genaue Konstruktion der Mastanbindung sowie des Mastaufsatzstückes in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Somit wird deren thermischer Widerstand nicht berücksichtigt, das bedeutet, er wird auf unendlich gesetzt.

INITIALENTWURF

Hier wird der Schwerpunkt auf die Bestimmung der Material-Eigenschaften von Einzelelementen im Wärmepfad von der aktiven Zone zur Umgebung gelegt. Die genaue geometrische Gestaltung für eine optimale Ausnutzung von Wärmeleitungs-, Konvektions- und Strahlungseffekten stellt eine große Herausforderung dar und verlangt umfangreiche thermische Simulationen, was der Gegenstand des nächsten Unterabschnittes ist.

Für die optimale Ausnutzung von Wärmeleitungseffekten von der LED-Lötstelle über den Kühlkörper spielt das verwendete Material eine entscheidende Rolle. Aufgrund der großen Wärmeleitfähigkeiten beim gleichzeitig geringeren Eigengewicht kommen hier Leichtmetalle, insbesondere Aluminium, und thermisch leitfähige modifizierte Kunststoffe in Frage.

Thermisch leitfähig modifizierte Kunststoffe kombinieren die Verarbeitbarkeit von Kunststoffen mit dem Wärmeleitvermögen keramischer, metallischer und organischer Materialien. Die Gebrauchseigenschaften und damit das Potential im Wärmemanagement hängen in besonderem Maße

von den eingesetzten Ausgangswerkstoffen, wie Kunststoffmatrix, Füllstoffart, -form und -anteil sowie Additiven ab. Als Füllstoffe kommen sowohl elektrisch leitfähige metallische aber auch elektrisch isolierende keramische Werkstoffe in Frage. In Abhängigkeit vom Füllanteil und dem Füllwerkstoff können thermische Leitfähigkeiten von etwa 0,5 W/mK bis 20 W/mK eingestellt werden. Die Daten gebräuchlicher Füllstoffe sowie die realisierbaren Wärmeleitfähigkeiten gefüllter Kunststoffe sind in Abbildung 6.15 angegeben.

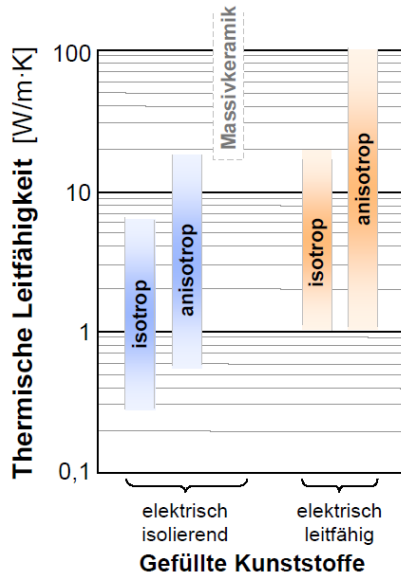


Abbildung 6.15: Übersicht der erreichbaren Wärmeleitfähigkeit von thermisch leitfähig modifizierten Kunststoffen [91]

Die Füllstoffzugabe führt nicht nur zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Compounds, sondern verändert die Charakteristik mechanischer Materialeigenschaften. Ein anwachsender Füllstoffanteil führt zu einer zunehmenden Versprödung der Werkstoffe. Da der zu entwickelnde Freiform-Reflektor als Teil des Leuchtengehäuses unter anderem gegen Witterungseinwirkungen, Hagel und Vandalismus beständig sein muss, wird im Rahmen dieser Arbeit gegen den Einsatz von wärmeleitenden Kunststoffen als Reflektormaterial entschieden. Die höheren Produktionskosten begünstigen diese Entscheidung. Folglich soll Aluminium als Material für den Freiform-Reflektor der Straßenleuchte zum Einsatz kommen.

Anschließend wird die Anbindung der LED mit dem Kühlkörper betrachtet. Diese Verbindung muss so realisiert werden, dass einerseits eine optimale Wärmeleitung gegeben ist, andererseits aber keine kritischen mechanischen Spannungen bei erwärmungsbedingter Ausdehnung der einzelnen Systemkomponenten auftreten. Um die Austauschbarkeit defekter LEDs und nicht des ganzen Beleuchtungsmoduls gewährleisten zu können, wird hier eine lösbare Pressverbindung der LED mit dem Kühlkörper gewählt. Dafür wird die LED mit einem Einschraubring von oben an den Kühlkörper gedrückt. Zum Schutz der Straßenleuchte gegen das Eindringen von Fremdkörpern und insbesondere der Feuchtigkeit werden des Weiteren eine PMMA-Platte mit einer Gummidichtung zwischen der LED und dem Einschraubring positioniert.

OPTIMIERUNG DES THERMISCHEN VERHALTENS

Im Laufe der domänenspezifischen Entwicklung der Optik wurde das optische Konzept geändert. Dabei wird auf das optische Element aus

Kunststoff, das einen Teil des Lichts erfassen und durch die integrierte Freiform-Linsenfläche eine effiziente Lichtlenkung erreichen sollte, aufgrund der dadurch verursachten hohen Lichtverluste verzichtet (s. Abbildung 6.13). Stattdessen soll nur einen Freiform-Reflektor für optimierte Lichtausbeute und Kühlleistung realisiert. Durch eine geschickte Anordnung der LED und des Reflektors und durch die optimierte Reflektor-Form gelingt es, ca. 98% des von der LED emittierten Lichtstroms mit diesem im Rahmen des Optikdesigns erarbeiteten Reflektor einzusammeln.

Bevor eine sukzessive Entwurfsoptimierung bezüglich thermischen Verhaltens durchgeführt wird, wobei Wärmeleitungs-, Konvektions- und Strahlungseffekte im Gesamtsystem optimal ausgenutzt werden sollen, findet eine genaue geometrische Gestaltung des Reflektors statt. Dafür wird er in drei Einzelteile zerlegt, die zuerst getrennt voneinander betrachtet werden. Diese sind neben dem eigentlichen Freiform-Reflektor der LED-Halter und deren Verbindungselement.

Bei der Auslegung des Freiform-Reflektors spielt der Öffnungswinkel der LED eine essenzielle Rolle. Er bezeichnet den gesamten Austrittswinkel des Lichts in einer Schnittebene und ist hier in erster Linie durch die Formgebung des LED-Halters und des Einschraubringes definiert, wie Abbildung 6.16 darstellt. Damit die zu entwickelnde Straßenleuchte die gestellten Beleuchtungsanforderungen erfüllt, ist ein möglichst großer Öffnungswinkel gefordert. Gemeinsam mit den Optikentwicklern wird der optimale Austrittswinkel aus dem LED-Halter auf 140° festgelegt, wobei die LED als eine Punktlichtquelle betrachtet wird. Dies entspricht einem Innendurchmesser des LED-Halters von 42 mm im Abstand zur LED von 6 mm. Damit auch die Randstrahle der verwendeten

großflächigen Lichtquelle den LED-Halter noch passieren können, wodurch eine optimale Ausleuchtung des Freiform-Reflektors erreicht wird, soll der innere Rand der Leiterplatte um mindestens 60° abgeschrägt werden (s. Abbildung 6.16).

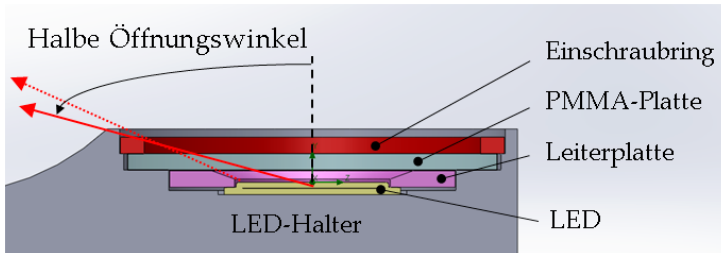


Abbildung 6.16: Querschnittsansicht des LED-Halters mit der LED, der Leiterplatte, der PMMA-Platte und dem Anschraubring. Während der gestrichelte Pfeil den Verlauf der Randstrahlen verdeutlicht, stellt der durchgehende Pfeil den Öffnungswinkel der Straßenleuchte dar.

Basierend darauf findet zunächst im Optikdesignprozess der Entwurf optisch wirksamer Flächen statt. Die sich dabei ergebenden geometrischen Randbedingungen bezüglich der Position der optischen Elemente stellt Abbildung 6.17 dar. Die LED wird darin in einer horizontalen Ebene ohne Verkippung in 35 mm Abstand zum Reflektor positioniert. Sie strahlt in den Halbraum in Richtung des Reflektors, weg von der Straße. Das emittierte Licht dieser LED wird durch den Freiform-Reflektor gewünscht in Richtung der Straßenebene gelenkt, wobei ein Teil davon am LED-Halter abgeschattet wird. Zur Reduzierung des daraus resultierenden Lichtverlustes soll der LED-Halter in der Ebene parallel zur Straßenebene möglichst klein sein. Wird die Flächenprojektion des

LED-Halters in der Straßenebene durch die geschwungene Form um ca. 45% verkleinert, wie Abbildung 6.18 (unten) darstellt, so erreicht 5% mehr das am Freiform-Reflektor gelenkte Licht die Straße.

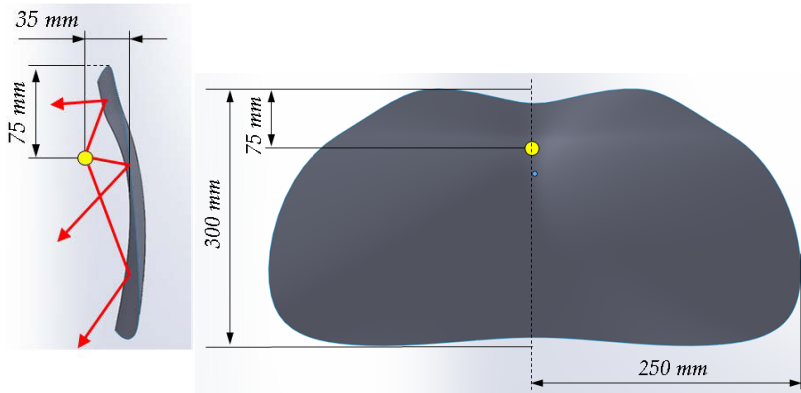


Abbildung 6.17: Schematische Ansicht der Konfiguration des Reflektor-Entwurfs. Der Freiform-Reflektor ist ca. 500mm x 300mm groß. Der gelbe Punkt kennzeichnet die LED-Position. Die LED liegt in der horizontalen Ebene, 35mm unter dem Freiform-Reflektor. Die roten Strahlen kennzeichnen den möglichen Strahlenverlauf der Lichtquelle.

Um dabei einen möglichst geringen thermischen Widerstand der Wärmeleitung im LED-Halter zu erzielen, sind nach Gleichung (2.8) bei der festgelegten Wärmeleitfähigkeit eine möglichst kleine Schichtdicke d und eine große Querschnittsfläche A erforderlich. Im Laufe des Designprozesses des optischen Systems wurde sowohl der Abstand von der Mitte der Led zur hinteren Reflektorseite (75 mm in Abbildung 6.17) als auch die Flächenprojektion des LED-Halters in der Straßenebene festgelegt.

Somit verbleibt die andere Flächenseite (hier: die Dicke des LED-Halters) als modifizierbare Größe für den Designprozess des Thermomanagements.

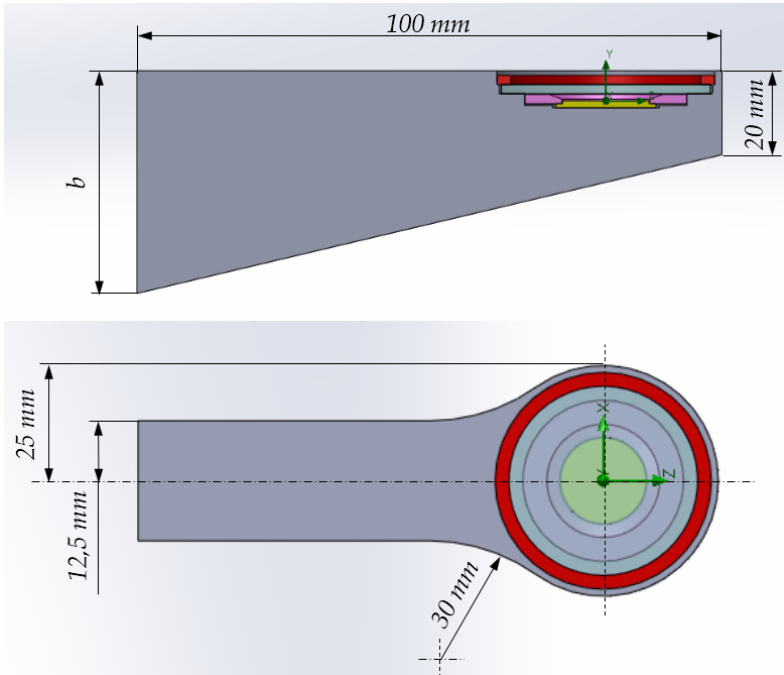


Abbildung 6.18: Vorderansicht als Schnittdarstellung (oben) und Draufsicht (unten) auf den LED-Halter samt der LED, der Leiterplatte, der PMMA-Platte und dem Anschraubring

Um hier die Anforderung an ein möglichst geringes Leuchtengewicht zu gewährleisten, steht ein trapezförmiger Querschnitt entlang des LED-Halters zur Intensivierung des radialen Wärmeflusses im Vordergrund.

Aus dem inneren Design des LED-Halters ergibt sich die kleinere Trapezgrundseite zu 20 mm als Minimum, wie Abbildung 6.18 oben darstellt. Die Höhe des daraus resultierenden rechtwinkligen Trapezes ergibt sich aus der Summe des Abstandes von der Mitte der Led zur hinteren Reflektorseite von 75 mm und dem Radius des LED-Halters von 25 mm (Abbildung 6.18 unten) zu 100 mm.

Tabelle 6.12 zeigt die Änderung des Wärmeleitvorganges im LED-Halter in Abhängigkeit von der Größe der Trapez-Basis b . Dafür wird eine Vielzahl einzelner thermischer Simulationsläufe mit der Verlustleistung von $P_{th}=33,3$ W und einer höchstens zulässigen Umgebungstemperatur von 25 °C durchgeführt. Diese Verlustleistung ergibt sich nach Gleichung (2.24), wobei ein optischer Wirkungsgrad der LED von 20% berücksichtigt wird. Der Wärmetransport findet hier zunächst lediglich über Wärmeleitung und Konvektion statt (keine Wärmestrahlung).

Die Güte des Wärmeleitvorganges im LED-Halter und somit des aktuellen Parametersatzes wird über die Differenz zwischen der mittleren LED-Lötstellentemperatur und der mittleren Temperatur am Ende des LED-Halters ermittelt. Die Berechnung des entsprechenden Gütemaßes erfolgt nach Gleichung (6.8). Dabei wird die relative Änderung des aktuellen Wertes y_i für die Temperaturdifferenz, bezogen auf ihren alten Wert y_{i-1} berechnet. Die beiden hierzu benötigten Temperaturen ergeben sich aus den durchgeführten thermischen Simulationen.

Tabelle 6.12: Temperaturverlauf innerhalb des LED-Halters in Abhängigkeit von seiner Dicke ($P_{th}=33,3\text{ W}$, $T_U=25^\circ\text{C}$)

Trapez-Basis b [mm]	Temperaturdifferenz zw. Lötstelle und Ende des LED-Halters [K]	Gütemaß [%]
30	27,1	-
40	20,6	24,0
50	16,7	18,9
60	14,0	16,2
70	12,3	12,1
80	11,2	8,9
90	10,5	6,3
100	9,9	6,7
110	9,3	5,2
120	8,7	5,4
130	8,4	3,4
140	8,3	1,1
150	8,3	0,7
160	8,2	0,5
170	8,2	0,5

Anhand der abnehmenden Temperaturdifferenz zwischen Kopf und Fuß des LED-Halters ist ersichtlich, wie sich die Wärmeleitung entlang des LED-Halters mit zunehmender Trapez-Basis b verbessert. Der

Grund hierfür liegt in der radialen Wärmespreizung: Durch die Vergrößerung des spitzen Trapezwinkels verbessert sich der radiale Wärmefluss in Richtung des Verbindungselementes und somit des Freiform-Reflektors. Außerdem geht aus Tabelle 6.12 hervor, dass der Verlauf des Gütemaßes mit immer kleineren Abweichungen einem festen Wert für die Temperaturdifferenz zwischen Kopf und Fuß des LED-Halters nähert. Da dabei eine Änderung der Größe der Trapez-Basis von 130 mm auf 170 mm also um 30,8% eine vernachlässigbar kleine Änderung der Temperaturdifferenz von 2,4% verursacht, ergibt sich die optimale Größe der Trapez-Basis für das gewünschte thermische Systemverhalten zu 130 mm.

Vom LED-Halter bewegt sich nun die Wärme über das Verbindungselement in Form eines Fächers zum Freiform-Reflektor. Im Folgenden wird mit Hilfe von thermischen Simulationen ($P_{th}=33,3$ W, $T_U=25$ °C, $b=130$ mm) die optimale Dicke dieses Verbindungselementes bestimmt. Die Beurteilung der Güte des aktuellen Parametersatzes findet hierbei anhand der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Kopf und Fuß des Verbindungselementes statt. Der Verlauf dieses Gütemaßes in Abhängigkeit von der Dicke des Verbindungselementes ist in Tabelle 6.13 ersichtlich und konvergiert nach etwa 10 Schritten mit einer Abweichung von 5%. Mit dem Ziel, das Gewicht der Straßenleuchte gering zu halten, liegt die optimale Dicke des Elementes bei 20 mm.

Tabelle 6.13: Temperaturverlauf innerhalb des LED-Halters in Abhängigkeit von seiner Dicke ($P_{th}=33,3\text{ W}$, $T_U=25^\circ\text{C}$)

Dicke des Verbindungselementes [mm]	Temperaturdifferenz zw. Kopf und Fuß des LED-Halters [$^\circ\text{C}$]	Relative Änderung der Temperaturdifferenz [%]
2	14,1	-
4	10,3	27,0
6	7,8	24,3
8	6,1	21,8
10	5,1	16,4
12	4,6	9,8
14	4,1	10,7
16	3,7	9,8
18	3,5	5,4
20	3,5	2,2
22	3,4	1,9
24	3,5	1,4

Im Hinblick auf die thermische Dimensionierung des Reflektors bringt die Widerstandsfähigkeit gegen extreme Umwelteinflüsse wie Hagel weitere geometrische Rahmenbedingungen mit sich. Zu den wichtigsten gehört dabei die minimale Dicke des Freiform-Reflektors, die im Rahmen dieser Arbeit auf 5 mm festgelegt wurde. Mit Hilfe des daraus resultierenden Simulationsmodells wird zuerst die erreichbare Temperatur des LED-Chips ermittelt und gegebenen falls durch die Vergrößerung der

Dicke des Freiform-Reflektors reduziert. Unter Einbeziehung der Wärmestrahlung lässt sich eine durchschnittliche Temperatur am LED-Chip der Straßenleuchte von $T_J=74,6\text{ °C}$ erwarten. Diese liegen deutlich unterhalb des definierten Zielparameters von $T_{J\max}=80\text{ °C}$. Die dabei zu erwartende Temperaturverteilung im Simulationsmodell wird in Abbildung 6.19 gezeigt.

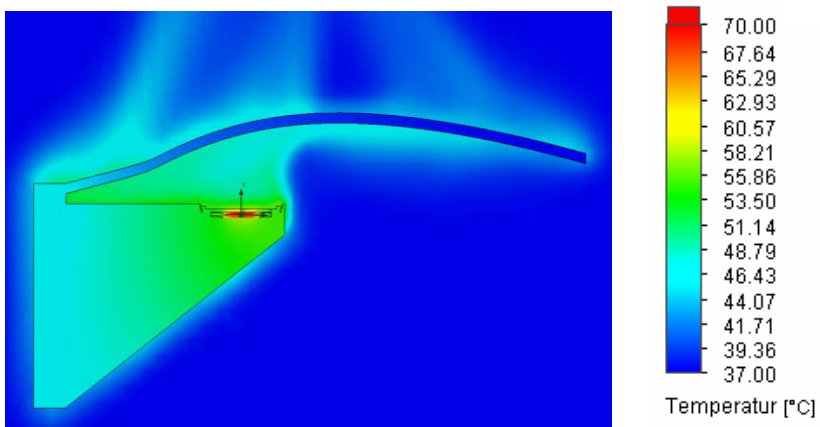


Abbildung 6.19: Grafische Darstellung der Simulationsergebnisse der Straßenleuchte ($P_{th}=33,3\text{ W}$, $T_U=25\text{ °C}$): Festkörpertemperatur in der Querschnitt-Darstellung

6.2.2 PHASE 2: FERTIGUNG

Als Nächstes wird die herstellungstechnische Umsetzung betrachtet. Von besondere Bedeutung ist hier der Freiform-Reflektor, da er als zent-

rales Bauteil für Optik und Entwärmung sowohl die optische Oberflächenqualität und –form als auch die Struktur der Kühlung hochgenau wiedergeben muss, ohne dass eine der beiden Eigenschaften leidet.

TOLERIERUNG

Die größte Herausforderung für die fehlerfreie Funktionalität des Thermomanagements besteht hier in der herstellungstechnischen Anbindung der LED an den Kühlkörper. Wie in [78] gezeigt, beeinflussen von den mechanischen Größen die wirkende Kontaktkraft und die Welligkeit die wärmeleitende Gesamtfläche und somit den Wärmetransport an der Kontaktstelle am stärksten. Bei der zu realisierenden Pressverbindung ist die Anpresskraft durch den Einschraubring begrenzt. Folglich liegt es näher, die Unebenheiten und Rauheiten der zu verbindenden Oberflächen für optimalen Wärmeübergang möglichst klein zu halten. Hierzu soll die Rauheit der Kühlkörperoberfläche nach dem Herstellungsverfahren den Wert von $3,5\text{ }\mu\text{m}$ nicht überschreiten.

FERTIGUNGSEIGNUNG UND HERSTELLBARKEIT

Zum Erfüllen der gestellten Anforderungen an die Oberflächenqualität und –form werden die Fertigungsverfahren in Hinsicht der erzielbaren Genauigkeiten des damit hergestellten Freiform-Reflektors und der damit verbundenen Kosten betrachtet.

Eine Möglichkeit zur Herstellung einer Freiformfläche in kleiner Stückzahl besteht im Einsatz eines Kugelschaftfräasers. Dabei wird die auf-

wendige dreidimensionale Oberflächenform aus einem massiven Aluminiumkörper durch das Abtragen von Material erstellt und anschließend mit geeigneten Oberflächenbearbeitungen wie Polieren fertiggestellt.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Anzahl notwendiger Fertigungsschritte bei der Herstellung des Freiform-Reflektors besteht in der Aluminium-Druckgusstechnik. Dabei wird das Negativ der herzustellenden Geometrie als Hohlraum über Kugelschaftfräsverfahren in ein Werkzeug übertragen, das typischerweise aus Stahl besteht und sich aus einer Reihe verschiedener Einsätze zusammensetzt. Die erforderliche Genauigkeit des Freiform-Reflektors stellt hohe Herausforderungen an das Werkzeug. In einem zweiten Schritt wird flüssiges Material unter hohem Druck und mit großer Geschwindigkeit in den Hohlraum eingespritzt. Nach dem Abkühl- und Auswurfvorgang liegt der Freiform-Reflektor dann direkt fertig vor und es sind keine weiteren Bearbeitungsschritte nötig.

Reines Aluminium wird als Gusswerkstoff kaum eingesetzt, da seine Festigkeitseigenschaften für den betrachteten Verwendungszweck ungenügend sind. Die wirtschaftlich bedeutendste Aluminiumlegierung, die im Gussverfahren hergestellt wird, ist die Verbindung von reinem Aluminium mit Silizium. Diese Aluminiumlegierung verfügt über hervorragende Gieß- und Festigkeitseigenschaften. Ein weiterer Vorteil ist der hohe Eigenschutz gegen Korrosion.

6.2.3 PHASE 3: VALIDIERUNG

Wenn die Herstellung der optischen Bauteile erfolgreich abgeschlossen ist, folgt deren photometrische Überprüfung in einem Prototypenmessaufbau. Da zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit kein Funktionsmuster zur Verfügung stand, konnte leider die abschließende Phase des Entwicklungsprozesses der Straßenleuchte nicht durchgeführt werden.

6.3 BEWERTUNG DER ENTWICKLUNGSSYSTEMATIK

Abschließend wird die erarbeitete Systematik anhand der Anforderungen aus Abschnitt 3.1 bewertet. Dazu wird für jede Anforderung knapp erläutert, inwiefern sie durch die Systematik erfüllt wird.

- Bedarf an einem domänenübergreifenden Vorgehensmodell

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept zur interdisziplinären Entwicklung von LED-Systemen in der Allgemeinbeleuchtung vorgestellt. Das grundsätzliche Vorgehen erfolgte dabei anhand eines Top-Down-Ansatzes von abstrakt nach detailliert.

- Unterstützung des domänenübergreifenden Problem- und Zielverständnisses

Der Makrozyklus beschreibt das grundsätzliche Vorgehen für die Integration der an der Entwicklung der LED-Systeme beteiligten domänenspezifischen Prozesse. Basierend auf der Grundstruktur eines LED-

Systems wird dabei in der Phase des Systementwurfs eine domänenübergreifende Prinziplösung für das zu betrachtende System erarbeitet. Hierzu werden nicht nur die Eigenschaften und Beziehungen der möglichen Systembestandteile, sondern auch das resultierende Systemverhalten festgelegt.

- Strukturierung der thermischen Dimensionierung

Die Systematik zur thermischen Dimensionierung der LED-Systeme in Allgemeinbeleuchtung bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Sie geht von einer vorhandenen domänenübergreifenden Prinziplösung aus und betrachtet technische, organisatorische und informative Aspekte des Entwicklungsprozesses. Der grundlegende Ablauf orientiert sich dabei an dem V-Modell der Mikrozyklen. Das Vorgehensmodell wird zudem in Phasen sowie untergliederte Prozessschritte unterteilt.

- Unterstützung des Thermomanagements durch Methodenempfehlung

Sowohl im V-Modell als Makrozyklus als auch als Mikrozyklus werden Methoden zur Produktentwicklung der LED-Systeme empfohlen. Die Empfehlung beruht dabei auf der Auswahl etablierter Methoden mit möglichst geringem Aufwand. Die Beschreibung der Hilfsmittel zur thermischen Dimensionierung ist dabei auf den Bereich der passiven Erwärmung beschränkt.

- Unterstützung der funktionsorientierten Denkweise

Während der domänenübergreifenden Entwicklung der LED-Systeme findet ausgehend von den Anforderungen eine erste Aufteilung in Module des zu entwickelnden Systems statt. In einem nächsten Schritt erfolgt in den beteiligten Domänen die weitere System-Konkretisierung der spezifizierten Module. Dafür werden die Hauptfunktionen der Module in die Teilfunktionen analytisch zerlegt. Anschließend wird nach möglichen Teillösungen gesucht, welche die jeweilige Teilfunktion erfüllen. Diese Vorgehensweise greift das Vorgehensmodell der erarbeiteten Entwicklungssystematik mit den Phasen der konzeptionellen Auslegung und des Initialentwurfs explizit auf.

- Keine Behinderung der Änderungsdynamik

Durch den Einsatz eines Top-Down-Entwicklungsablaufs werden frühzeitig Fehler und Schwächen im Systementwurf erkannt. Durch die Einbeziehung der Modellbildung ergibt sich die Möglichkeit, einen Großteil der Entwicklung in frühe Entwicklungsphasen zu verlagern und damit kosten- und zeitintensive Änderungen in späteren Entwicklungsphasen zu vermeiden. Im Vorgehensmodell zur thermischen Dimensionierung der LED-Systeme in Allgemeinbeleuchtung sind neben den einzelnen Phasen auch die zu beachtenden Wechselwirkungen in Form von Restriktionen an entsprechenden Stellen aufgeführt worden. Durch eine überschaubare Zahl von Restriktionen wird dabei eine hohe Änderungsdynamik erreicht. Dadurch eignet sich das vorgestellte Vorgehensmodell, im Vergleich zu reinen sequentiellen Modellen wie z. B. das Wasserfall-Modell, auch für komplexe Großprojekte mit einer ständigen modulübergreifenden Abstimmung der beteiligten Domänen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die erarbeitete Entwicklungssystematik der thermischen Dimensionierung qualitativ hochwertiger LED-Systeme die gestellten Anforderungen in vollem Umfang erfüllt. V-Modell als Makrozyklus deckt nicht nur den reinen Entwicklungsprozess ab, sondern auch verwandte vor- und nachgereifte Prozesse. Die erarbeitete Entwicklungssystematik ist sowohl für die Großprojekte mit einer ständigen modulübergreifenden Abstimmung der beteiligten Domänen als auch für die Kleinprojekte mit einer relativ isolierten Entwicklung des Thermomanagements geeignet.

Kapitel 7

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Als Folge einer ausgeprägten Temperaturabhängigkeit der LEDs ist der Entwicklungsprozess der LED-Systeme sehr komplex. Diese Komplexität ergibt sich aufgrund der größeren Anzahl von verkoppelten Elementen, die in unterschiedlichen Disziplinen realisiert werden. Aufgrund dieser Tatsache besteht Bedarf nach einem disziplinübergreifenden Entwicklungsprozess, der die Aufgaben, Probleme und Anforderungen aller Disziplinen berücksichtigt.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Entwicklungssystematik des Thermomanagements qualitativ hochwertiger LED-Systeme in der Allgemeinbeleuchtung vorgestellt. Ihr Kern bildet ein Vorgehensmodell zur Beherrschung der Komplexität und Erhöhung der Transparenz innerhalb des Produktentwicklungsprozesses. Durch ihren Einsatz werden außerdem eine Verbesserung der Planbarkeit und eine Erleichterung der Durchführung des Produktentwicklungsprozesses erreicht. Das grundsätzliche Vorgehen setzt sich aus zwei Elementen zusammen.

Den ersten Teil der Systematik beschreibt das grundsätzliche Vorgehen für die Integration der an der Entwicklung der LED-Systeme beteiligten domänenspezifischen Prozesse. Dieses Vorgehen beinhaltet die zu beachtenden Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Entwicklungsdisziplinen, wie der Optik, der Thermomanagement und der Elektrotechnik, und kombiniert diese so miteinander, dass das Synergiepotential

nutzbar wird. Durch die Unterteilung des Entwicklungsprozesses in logische und zeitlich voneinander abgegrenzte Phasen wurde dabei ein strukturierter Abwicklungsplan in Form eines Phasenmodells vorgestellt, wobei überschaubare und typische Tätigkeiten und Methoden zur Verdeutlichung dargestellt wurden. Dadurch konnten die Komplexität der jeweiligen Problemstellung und damit auch das Risiko einer Fehlentscheidung reduziert werden.

Die erarbeitete domänenübergreifende Prinzipiellösung dient dabei als Ausgangsbasis für den zweiten Teil der Systematik: eine systematische Vorgehensweise für den domänenspezifischen Entwicklungsprozess. Die bis dahin weitgehend sequentielle Entwicklung wurde entsprechend der spezifizierten Entwicklungsdomänen in parallele Stränge der domänenspezifischen Entwicklung aufgeteilt. Das Erstellen der vollständigen Entwicklungsunterlagen ist das Ergebnis der domänenspezifischen Entwicklung. Aus einer Analyse des Entwicklungsprozesses auf Prozessebene folgt, dass es in drei wesentliche Prozessschritte unterteilt werden kann. Nachdem eine Verzahnung der am Entwicklungsprozess der LED-Systeme relevanten Disziplinen mit der ingenieurwissenschaftlichen Vorgehensweise in der Produktentwicklung spezifiziert wurde, folgt eine detaillierte Zuordnung der Tätigkeitsbeschreibungen im Sinne von Leitfäden den Phasen sowie Methodenempfehlungen des Thermalmanagements. Die Beschreibung der Hilfsmittel wurde auf den Bereich der passiven Entwärmung beschränkt, da aufgrund der Lüfterflügelrotation die aktiven Entwärmungskonzepte für das menschliche Ohr hörbare Luftbewegungen erzeugen, die in vielen Anwendungsbereichen in der Allgemeinbeleuchtung nicht erwünscht sind.

Für die fehlerfreie Funktionalität des Thermomanagements muss außerdem die zeitliche und örtliche Entstehung von Fehlern und deren Auswirkungen während des Herstellungsprozess betrachtet werden. Zur methodischen Untersuchung des Einflusses von Einzeltoleranzen auf das thermische Zusammenwirken der ausgelegten Einzelelemente wurde im Rahmen dieser Arbeit zuerst der Stand der Technik auf dem Gebiet der Toleranzanalyse vorgestellt. Aus den dargestellten Ansätzen wurde anschließend der Handlungsbedarf für den Einsatz der geometrieorientierten Bauteilanalyse während der thermischen Dimensionierung abgeleitet. Dabei wurde festgestellt, dass eine der größten Fehlerquellen während der Toleranzenvergabe im Entwicklungsprozess oftmals in der Gestaltung des Wärmeübergangs zwischen ausgelegten Einzelelementen liegt.

Die Validierung der Entwicklungssystematik erfolgte anhand der Konzipierung von zwei Demonstratoren. Hierzu wurde das Vorgehensmodell der Entwicklungssystematik vollständig durchgelaufen, die Hilfsmittel angewendet und die so erstellten Resultate vorgestellt. Ferner wurde am zweiten Beispiel demonstriert, wie neben einer ständigen modulinternen auch eine ständige modulübergreifende Abstimmung der beteiligten Domänen innerhalb der Phase der domänenspezifischen Entwicklung erfolgen kann. Die Berücksichtigung der engen Kopplung der einzelnen domänenspezifischen Funktionsmodule im Entwicklungsprozess des Thermomanagements zeigte neue Erfolgspotentiale für die Gestaltung neuer Produkte und Anwendungen auf. Somit erfüllt die erarbeitete Entwicklungssystematik des Thermomanagements qualitativ hochwertiger LED-Systeme in der Allgemeinbeleuchtung die aufgestellten Anforderungen auf der Prozessebene im vollen Umfang.

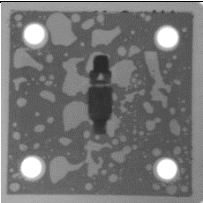
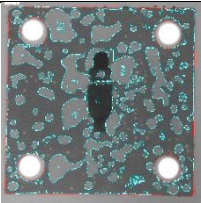
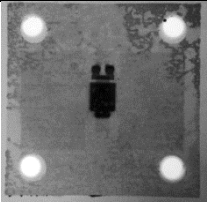
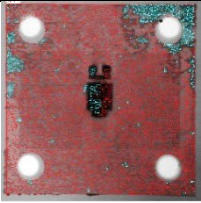
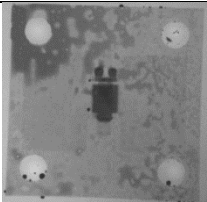
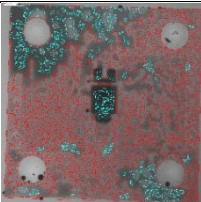
Für die Integration der fachdisziplinspezifisch erarbeiteten Ergebnisse zu einer Gesamtlösung besteht weiterer Forschungsbedarf. Zukünftige Arbeiten müssen die Verzahnung der beteiligten Disziplinen auf Datenebene weiter vorantreiben. Es wird die Systemintegrationsphase und somit das Management von Daten innerhalb der Entwicklung hochwertiger LED-Systeme in der Allgemeinbeleuchtung stärker in den Vordergrund rücken.

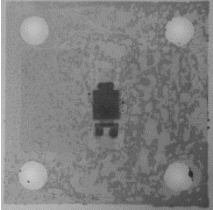

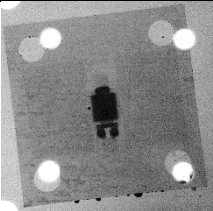
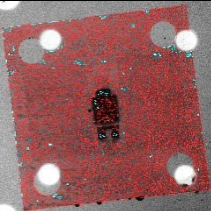
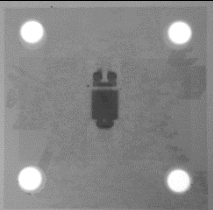
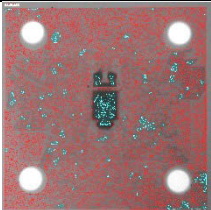
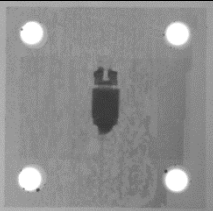
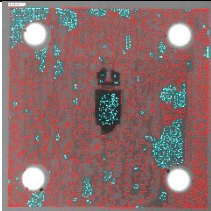
Ein großer Nutzen würde sich aus Strategien zur Beschleunigung von Entwurfsoptimierungsproblemen ergeben. Zukünftige Untersuchungen sollen speziell den Einsatz von Bewertungsfunktion, Optimierungsalgorithmen und Optimierungsparameter für höherdimensionale Problemstellungen zur Verbesserung von thermischen Vorgängen im LED-System untersuchen und verbessern.

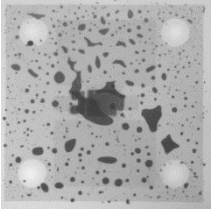
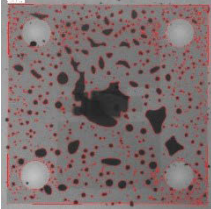
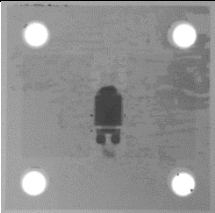
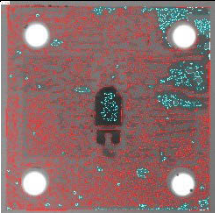
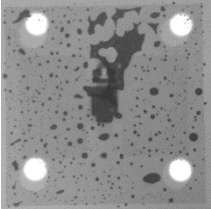
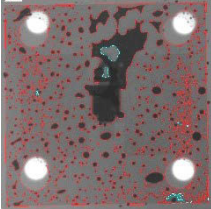
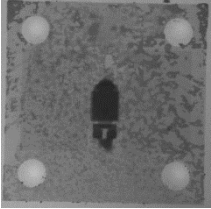
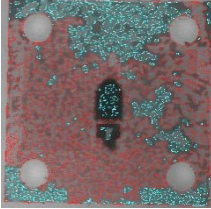
Übergeordnetes Ziel zukünftiger Forschungsarbeiten ist die Entwicklung intelligenter LED-Systeme. Sie muss dem Trend der zunehmenden Bedeutung von Informationsverarbeitung in Beleuchtungssystemen und deren innovativen Lösungen gerecht werden. Damit ergeben sich hier neue Forschungsfelder.

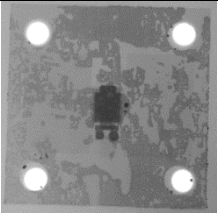
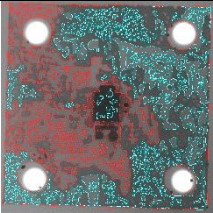
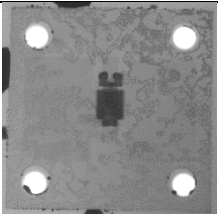
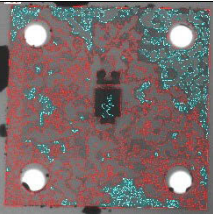
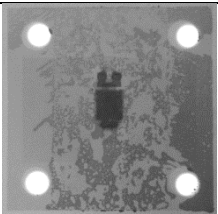
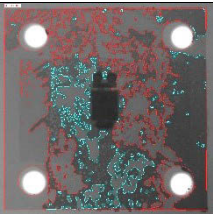
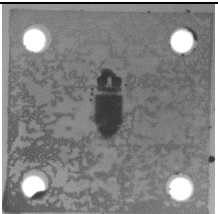
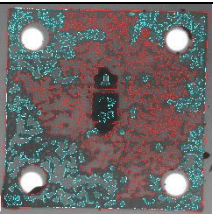
ANHANG

INSPEKTION DER UNLÖSBAREN STOFFSCHLÜSSIGEN VERBINDUNGEN MITTELS RÖNTGENMIKROSKOPIE

Nr.	Röntgen-Durchlicht-Aufnahmen (unbearbeitet)	Auswertung mit der Prüf- und Inspektionsanlag XD6500 der Firma Nordson DAGE
1		 Rel. Kontaktfläche von 64,1%
2		 Rel. Kontaktfläche von 47,7%
3		 Rel. Kontaktfläche von 46,9%

4		 Rel. Kontaktfläche von 46,3%
5		 Rel. Kontaktfläche von 38,1%
6		 Rel. Kontaktfläche von 40,8%
7		 Rel. Kontaktfläche von 45,1%

8		 Rel. Kontaktfläche von 32,3%
9		 Rel. Kontaktfläche von 41,7%
10		 Rel. Kontaktfläche von 33,6%
11		 Rel. Kontaktfläche von 45,8%

12		 Rel. Kontaktfläche von 51,8%
13		 Rel. Kontaktfläche von 43,3%
14		 Rel. Kontaktfläche von 59,1%
15		 Rel. Kontaktfläche von 38,1%

DANKSAGUNG

Dass diese Arbeit entstehen konnte, bedurfte der Unterstützung, Hilfe und Beteiligung vieler Menschen, denen ich an dieser Stelle von Herzen meinen Dank aussprechen möchte.

Allen voran danke ich meinem Doktorvater, Prof. Dr. Christoph Schierz. Seine wertvolle Kritik, seine Genauigkeit und nicht zuletzt seine Geduld haben viel zum erfolgreichen Abschluss der Dissertation beigetragen.

Speziell geht mein Dank meinem Betreuer seitens des Lichttechnischen Institutes in Karlsruhe, Prof. Dr. Cornelius Neumann, der mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand, der mir die Zeit zur Verfügung gestellt hat, die ich benötigt habe, um meine Ideen und Ergebnisse zu Papier zu bringen und der mir geholfen hat, nicht den Wald aus den Augen zu verlieren. Ohne das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Großer Dank gilt meinen Kollegen am Lichttechnischen Institut in Karlsruhe, die durch ihr Spezialwissen ihren Beitrag zu dieser Arbeit geleistet. Insbesondere danke ich Christian Herbold für viele interessante, avantgardistische Ideen in unseren zahlreichen Diskussionen und das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Des Weiteren geht mein Dank an das Bundesministerium für Bildung und Forschung, ohne deren finanzielle Unterstützung die Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

DANKSAGUNG

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Ehemann, der mich immer unterstützt hat, auch wenn es mal gerade nicht so gut lief. Er hat mich immer wieder aufgebaut und Kraft gegeben, insbesondere während der Fertigstellung dieser Dissertation.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] OSRAM Opto Semiconductors, *Zuverlässigkeit und Lebensdauer von LEDs. Applikationsschrift*, 2013.
- [2] A. Christensen und S. Graham, *Thermal effects in packaging high power light emitting diode arrays*, Applied Thermal Engineering, Volume 29, Issues 2–3, S. 364–371, February 2009.
- [3] M. Arik, J. Petroski und S. Weaver, *Thermal Challenges in the future generation solid-state lighting applications: Light Emitting Diodes*, Proc. of the ASME/IEEE ITherm-Conference, S. 113 - 120, 2002.
- [4] W. Kölscheid, *Methodik zur lebenszyklusorientierten Produktgestaltung - Ein Beitrag zum Life Cycle Design*, Dissertation, Universität Paderborn, 1999.
- [5] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen und K. H. Grote, *Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung*, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [6] G. Assman, *Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung*, Dissertation, Technische Universität München, 2000.

- [7] J. Gausemeier, C. Plass und C. Wenzelmann, *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2009.
- [8] D. Nordseik, *Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinzipiöslösung mechatronischer Systeme*, Dissertation, Universität Paderborn, 2012.
- [9] M. A. Schlüter, *Innovative Kühlkonzepte für LED-Scheinwerfer*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2011.
- [10] S. Strauß, *Theoretische und experimentelle Untersuchungen Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung*, Dissertation, Universität Paderborn, 2007.
- [11] C. Kittel, *Einführung in die Festkörperphysik*, Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2006.
- [12] M. Scholdt, *Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2013.
- [13] G. Meneghesso, M. Meneghini und E. Zanoni, *Recent results on the degradation of white LEDs for lighting*, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 43 (23), August 2010.
- [14] O. Pursiainen, N. Linder, A. Jaeger, R. Oberschmid und K. Streubel, *Identification of Aging Mechanisms in the Optical and Electrical*

- Characteristics of Light-Emitting Diodes*, Applied Physics Letters, Vol. 79, 2001.
- [15] K. Hengesbach, P. Hille, F. Koch, J. Lehberger, D. Müser, G. Pyzalla, W. Quadflieg, W. Schlilke und J. Schmidt, *Berufsfeld Metall - Industriemechanik*, 3. Auflage, Bildungsverlag E1NS-Stam, Troisdorf, 2003.
- [16] G. Farkas, Q. Vader, A. Poppe und G. Bogнар, *Thermal investigation of high power Optical Devices by transient testing*, 9th THERMINIC Workshop, Aix-en-Provence, France, 24-26 September 2003.
- [17] M. Wütz, *Wärmeabfuhr in der Elektronik*, Vieweg Verlag, 1991.
- [18] W. Krause, *Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik*, Carl Hanser Verlag, München, 2000.
- [19] J. Lienig und H. Neubert, *Geräteentwicklung, Grundwissen für Studenten der Elektrotechnik und Mechatronik*, Initial Verlag, Großerkmannsdorf, 2010.
- [20] J. Lienig und H. Brümmer, *Elektronische Gerätetechnik - Grundlagen für das Entwickeln elektronischer Baugruppen und Geräte*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [21] H. Kaplan, *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*, 3. Auflage, SPIE Press, 2007.
- [22] W. Wagner, *Wärmeübertragung*, Würzburg: Vogel, 1998.

- [23] H. Baehr und K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
- [24] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), *VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*, 10. erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2006.
- [25] R. Marek und K. Nitsche, *Praxis der Wärmeübertragung*, Carl Hanser Verlag, München, 2007.
- [26] R. Stout, *Thermal RC Ladder Networks*, tech. rep., ON Semiconductor, April 2006.
- [27] J. H. Ferziger und M. Peric, *Numerische Strömungsmechanik*, 1. deutsche Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2008.
- [28] E. Laurien und H. J. Oerter, *Numerische Strömungsmechanik*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2009.
- [29] S. M. Elkuri, *Thermische Untersuchungen an leistungselektronischen Systemen*, Dissertation, Universität Ilmenau, 2005.
- [30] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI), *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206*, Beuth-Verlag, Berlin, 2004.
- [31] W. W. Royce, *Managing the development of large software systems: concepts and techniques*, Proc. of the 9th international conference on Software Engineering, Los Alamitos, CA, S. 328–338, 1987.

- [32] B. W. Boehm, *Software Engineering Economics*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1981.
- [33] K. Ehrlenspiel, *Integrierte Produktentwicklung*, Hanser Verlag, München, 1995.
- [34] O. Oberschelp, *Strukturierter Entwurf selbstoptimierender mechatronischer Systeme*, Dissertation, Universität Paderborn, 2008.
- [35] S. Wendel, *Freiform-Optiken im Nahfeld von LEDs*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2014.
- [36] J. Gausemeier und J. Lückel, *Entwicklungsumgebungen Mechatronik*, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 80, Universität Paderborn, 2000.
- [37] K. Feldmann und J. Gausemeier, *Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen*, 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien , 2005.
- [38] R. Kulke, M. Rittweger, P. Uhlig und C. Günner, *LTCC-Mehrlagerkeramik für Funk- und Sensor-Anwendungen*, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, S. 2131-2136, 2001.
- [39] C. Heinle, *Simulationsgestützte Entwicklung von Bauteilen aus wärmeleitenden Kunststoffen*, Dissertation, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [40] R. Huber, *Thermal Management of Golden DRAGON LED - Application Note*, Online: <http://www.osram->

- os.com/Thermal_Management_Of_Golden_Dragon_LED,
Zugriff am 15.04.2015.
- [41] S. Hörth, *Effizientes Wärmemanagement gefragt*, Online:
http://www.haeusermann.co.at/downloads/presseartikel/effizientes_waermemanagement_gefragt.pdf, Zugriff am 10.10.2015.
- [42] M. Norén, *Flip-Chip-Technologie auf keramische Substrate*, Dissertation,
Institut für Werkstofftechnik, Technische Universität Ilmenau,
2009.
- [43] M. Frank, *Vom Dienstleister zum Technologieunternehmen*, Online:
<http://www.all-electronics.de/vom-dienstleister-zum-technologieunternehmen/>, Zugriff am 01.11.2015.
- [44] F. Meyer, *Metallschäumen in der Wärmetechnik*, BINE projektinfo,
FIZ Karlsruhe GmbH, Online:
<http://www.bine.info/publikationen/publikation/metallschaume-in-der-waermetechnik/>, Zugriff am 15.11.2015.
- [45] T. E. Schmidt, *Verbesserte Methoden zur Bestimmung des Wärmeaustausches an berippten Rohren*, Kältetechnik - Klimatisierung
18, S. 135-138, 1966.
- [46] T. E. Schmidt, *Die Wärmeleistung von berippten Oberflächen*, Abh. des
Deutschen Kältetechnischen Vereins Nr. 4, C.E Maller Verlag,
Karlsruhe, 1950.

- [47] C. Markert, *Erwärmungsprobleme in elektronischen Geräten und ihre konstruktive Berücksichtigung*, Dissertation, Technische Universität Dresden, 1965.
- [48] C. Herbold, *Effiziente Innenleuchten: Von der Wissenschaft in die Produktion*, Tagungsband, Licht 2014, Den Haag, Niederlande, 2014.
- [49] C. Herbold, *Vorbild Natur: Bionische Strukturen zur Entwärmung von LEDs*, Tagungsband, Licht 2012, Berlin, 2012.
- [50] W. J. Cassarly, *Illumination merit functions*, Proc. SPIE 6670, San Diego, CA, August 26, 2007.
- [51] J. Meier, S. Rudolph und T. Schanz, *Effektiver Algorithmus zur Lösung von inversen Aufgabenstellungen - Anwendung in der Geomechanik*, Bautechnik, Vol. 83, Issue 7, S. 470 - 481, 2006.
- [52] S. Schwarz, *Sensitivitätsanalyse und Optimierung bei nichtlinearem Strukturverhalten*, Bericht Nr. 34, Institut für Baustatik, Universität Stuttgart, 2001.
- [53] W. Jorden, *Form- und Lagetoleranzen: Handbuch für Studium und Praxis*, 3. Auflage, Hanser Verlag, München, 2005.
- [54] S. Wittmann, *Verfahren zur Simulation und Analyse der Auswirkungen toleranzbedingter Bauteilabweichungen*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2010.

- [55] P. Hehenberger, *Computerunterstützte Fertigung - Eine kompakte Einführung*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [56] A. Fritz und G. Schule, *Fertigungstechnik*, 8. neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2008.
- [57] I. Savija, M. M. Yovanovich, J. R. Culham und E. E. Marotta, *Thermal Joint Resistance of Conforming Rough Surfaces with Grease-Filled Interstitial Gap*, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 17, No. 2, April–June 2003.
- [58] D. Tabor, *The Hardness of Metals*, Oxford Univ. Press, Amen House, London, 1951.
- [59] J. A. Greenwood und B. P. Williamson, *Contact of Nominally Flat Surfaces*, Proc. of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, Vol. A295, S. 300–319, 1966.
- [60] D. Meschede, *Gerthsen Physik*, Springer Verlag, Heidelberg, 2006.
- [61] IrfraTec, *Einführung in Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie*, Online: <http://www.thermografie.co.at/files/infratec.pdf>, Zugriff am 10.10.2015.
- [62] V. Vavilov und X. Maldague, *Optimization of Heating Protocol in Thermal NDT, Short and Long Heating Pulses: A Discussion*, Research In NDE. Vol. 6. Columbus, American Society for NDT, S. 1-17, 1994.

- [63] L. D. Favro, X. Han, Y. Wang, P. K. Kuo und R. L. Thomas, *Pulse-Echo Thermal Wave Imaging*, Review of progress in quantitative NDE, Vol. 14 edited Thompson D. O. and Chimenti D., Plenum, New York, S. 425-429, 1995.
- [64] J. L. Beaudoin, E. Merienne, R. Danjoux und M. Egee, *Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry*, Infrared Technology and Applications SPIE Vol. 590, S.287, 1985.
- [65] G. Busse, D. Wu und W. Karpen, *Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography*, J. Appl. Phys. Vol. 71, S. 3962-3965, 1992.
- [66] A. Poppe, *LED Thermal Characterization Made Easy*, tech. rep., Mentor Graphics Corporation, 2010.
- [67] S. Wittmann, *Verfahren zur Simulation und Analyse der Auswirkungen toleranzbedingter Bauteilabweichungen*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2011.
- [68] A. Stockinger, *Computer Aided Robust Design - Verknüpfung rechenunterstützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [69] Z. Humienny, A. Weckenmann und e. al., *Geometrische Produktspezifikation (GPS)*, Kurs für Technische Universität

- Erlangen, Lehrstuhl für Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, 2001.
- [70] H. Trumpold, C. Beck und G. Richter, *Toleranzsysteme und Toleranzdesign-Qualität im Austauschbau*, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1997.
- [71] T. Q. Pham, *Toleranzanalyse und Optimierung eines Finite-Elemente-Strukturmodells mit OptiY*, Tagesband, 19. Deutschsprachige Abaqus-Benutzerkonferenz, Baden-Baden, 2007.
- [72] H. S. Carslaw und J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, Oxford Science Publications, S. 23, 1946.
- [73] M. Bahrami, M. M. Yovanovich und J. R. Culham, *Thermal Joint Resistances of Nonconforming Rough Surfaces with Gas-Filled Gaps*, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 18, No. 3, July–September 2004.
- [74] M. G. Cooper, B. B. Mikic und M. M. Yovanovich, *Thermal Contact Conductance*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 12, S. 279–300, 1969.
- [75] M. Bahrami, J. R. Culham, M. M. Yovanovich und G. E. Schneider, *Review of Thermal Joint Resistance Models for Non-Conforming Rough Surfaces in a Vacuum*, American Society of Mechanical Engineers, Paper HT2003-47051, July 2003.
- [76] M. M. Yovanovich, *New Contact and Conductance Correlations for Conforming Rough Surfaces*, Spacecraft Radiative Transfer and

- Temperature Control, Vol. 83, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, New York, S. 83–95, 1982.
- [77] M. M. Yovanovich, J. R. Culham und P. Teertstra, *Calculating Interface Resistance*, Electronics Cooling, Vol. 3, No. 2, S. 1–7, 1997.
- [78] M. Bahrami, J. R. Culham, M. M. Yovanovich und G. E. Schneider, *Thermal Contact Resistance of Non-Conforming Rough Surfaces - Part 2: Thermal Model*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Paper 2003-4198, 2003.
- [79] Mentor Graphics Corporation Mechanical Analysis, *Theoretical background of the T3Ster measurement*, Wilsonville, 2012.
- [80] Mentor Graphics Corporation Mechanical Analysis, *T3Ster Thermal Transient Tester Technical Information 1029020-n*, Wilsonville, 2011.
- [81] JEDEC, Standard - Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path, 2010.
- [82] Diodes Incorporated, *Document Number: DS31234 Rev. 8 - 2*, Online: <http://www.diodes.com/downloads/6017>, Zugriff am 15.07.2015.
- [83] T. Bonenberger, J. Baumgart, A. Tarbeyevskaya, A. Grimm und C. Neumann, *LED-OASYS - Entwicklung einer einergieeffizienten*

- Tischbeleuchtung*, Tagungsband, Licht 2014, Den Haag, Niederlande, 2014.
- [84] Cree, Inc., *Product Family Data Sheet - Cree® XLamp® XM-L2 LEDs*, Online: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/Data-and-Binning/XLampXML.pdf>, Zugriff am 10.09.2015.
- [85] R. Skiba, *Taschenbuch Arbeitssicherheit*, Erich-Schmidt-Verlag, S. 466-468, 2005.
- [86] LLUMINATION SUPPLY, *Cree XP-G, 12mm Round MCPCB, R4, 1A Tint*, Online: <http://www.illumn.com/leds-drivers-optics-mcpcbs/cree-leds/cree-xp-g-16mm-round-mcpcb-r4-1a-tint.html>, Zugriff am 15.08.2015.
- [87] LTI, KIT, *Projektbeschreibung: StraTbOLED - Entwicklung einer kompakten Straßenleuchte mit maßgeschneiderter Kunststoff-Array-Optik für Multiquellen-Area-LED-Leuchtentechnologie und thermo-optisch ausgeführter Reflektor-Kühlkörper mit Gehäuse-Integration*, Karlsruhe, 2014.
- [88] TRILUX GmbH & Co. KG, *Beleuchtungspraxis-Außenbeleuchtung*, Beuth-Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- [89] EN 60598-1, *Leuchten – Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen*, 2009.

- [90] Samsung Electronics Co. Ltd., *Product Family Data Sheet: LC040B-COB LED*, Online: http://www.samsung.com/global/business/business-images/led/file/family/lighting/201310/LC040B_data_sheet_rev1.0-1.pdf, Zugriff am 01.11.2015.
- [91] S. Egelkraut, S. Zeltner, M. März und B. Eckardt, *Wärmeleitfähige Kunststoffe für Entwärmungsaufgaben*, Online: http://www.iisb.fraunhofer.de/content/dam/iisb/de/documents/geschaeftsfelder/leistungselektronische_systeme/veroeffentlichungen/KKK_peak_2008_Mz_ges.pdf, Zugriff am 01.10.2015.
- [92] S. Möhringer, *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, Habilitation, Universität Paderbon, 2004.